PROF. DR.-ING. WILHELM SCHÄFER

# TRANSFORMATOREN

SAMMLUNG GÖSCHEN

BAND 952

SAMMLUNG GÖSCHEN BAND 952

# TRANSFORMATOREN

von

PROF. DR.-ING. WILHELM SCHÄFER

Mit 73 Abbildungen

Vierte, überarbeitete und ergänzte Auflage

WALTER DE GRUYTER & CO.
vormals G. J. Göschen'sche Verlagshandlung · J. Guttentag,
Verlagsbuchhandlung · Georg Reimer · Karl J. Trübner · Veit & Comp.
BERLIN 1962

©

Copyright 1962 by Walter de Gruyter & Co., vormals G. J. Göschen'sche Verlagshandlung — J. Guttentag Verlagsbuchhandlung — Georg Reimer — Karl J. Trübner — Veit & Comp., Berlin W 30 — Alle Rechte, einschließlich der Herstellung von Photokopien und Mikrofilmen, vom Verlag vorbehalten.
Archiv-Nr. 7941620 — Satz und Druck: Walter de Gruyter & Co., Berlin W 30

Printed in Germany

# Inhaltsverzeichnis

Seite

I. Theoretische Grundlagen

1. Grundbegriffe und Wirkungsweise . . . . . 5
2. Grundgesetze der Transformation . . . . . 10
3. Magnetisierung des Eisenkernes und Eisenverluste . . . . . 12
4. Streuung . . . . . 19
5. Stromkräfte in der Wicklung . . . . . 26
6. Kupferverluste . . . . . 31
7. Wirkungsgrad . . . . . 35
8. Transformatorendiagramm . . . . . 38
9. Spannungsänderung . . . . . 42

II. Gestaltung der Transformatoren

10. Haupttypen der Transformatoren . . . . . 44
11. Spartransformatoren . . . . . 54
12. Regeltransformatoren . . . . . 58
13. Kernaufbau . . . . . 63
14. Wicklungsaufbau . . . . . 68
15. Durchführungen . . . . . 77
16. Kessel und Kühlung . . . . . 81
17. Materialaufwand und Materialaufteilung . . . . . 89
18. Rechnungsbeispiel . . . . . 94

III. Der Transformator im Betrieb

19. Schaltung und Parallellauf . . . . . 99
20. Ein- und Ausschaltvorgänge . . . . . 104
21. Überspannungsbeanspruchung . . . . . 111
22. Schutzeinrichtungen . . . . . 117
23. Prüfung . . . . . 120

Sachverzeichnis . . . . . 129

# I. Theoretische Grundlagen

## 1. Grundbegriffe und Wirkungsweise

Transformatoren sind ruhende Apparate, die dazu dienen, die elektrische Energie einer bestimmten Spannung in solche einer anderen Spannung umzuwandeln. Die elektrische Energie wird meist mit einer Spannung erzeugt, die zwischen 6000 und 12000 Volt liegt; die Fortleitung über große Strecken erfolgt bei Spannungen von 60000, 110000, 220000 Volt, oder noch höheren Werten, die Mittelspannungs-Versorgungsnetze wiederum werden mit etwa 10000—30000 Volt betrieben und die Verbraucherspannung beträgt meist 400/231 Volt, 400 Volt zwischen den Leitern, 231 Volt zwischen Leiter und Nullleiter. Diese Netze verschiedener Spannungen sind durch Transformatoren gekuppelt. Aus der Tatsache, daß der elektrische Strom auf seinem Weg von der Erzeugung zum Verbrauch meist dreimal, oft sogar noch häufiger, transformiert werden muß, erklärt sich die Wichtigkeit der Transformatoren für die elektrische Energieversorgung. Von ihrer Betriebssicherheit und ihrem Wirkungsgrad wird die technische und wirtschaftliche Güte der Elektrizitätsversorgung maßgeblich beeinflußt. Kein Wunder, daß unter solchem Nachdruck die Entwicklung des Transformatorenbaues außergewöhnlich weit getrieben wurde, daß der Transformator nicht nur eins der betriebssichersten Glieder der Hochspannungs-Versorgungssysteme geworden ist, sondern auch sein Wirkungsgrad auf Werte gesteigert werden konnte, die von anderen Maschinen nicht erreicht werden. Bei Großtransformatoren lassen sich mit wirtschaftlichem Aufwand Wirkungsgrade erzielen, die zwischen 99 und 99,5% liegen.

Der besseren Übersicht wegen sei den folgenden Kapiteln, die sich jeweils mit Einzelheiten befassen, eine kurze Zusammenfassung der wichtigsten Teile und Kenngrößen des Transformators und seiner Wirkungsweise vorangestellt.

In seinem aktiven Teil besteht der Transformator aus (im allgemeinen) zwei gegeneinander und gegen Erde isolierten

Wicklungen und dem Eisenkern, der die Wicklungen trägt (Abb. 1). Primärwicklung heißt — unabhängig davon, ob sie die höhere (Oberspannungswicklung) oder niedrigere (Unterspannungswicklung) Spannung besitzt — die Wicklung, der die elektrische Energie zugeleitet wird. Diese wird der Sekundärwicklung, vermindert um den Eigenverbrauch des Transformators, wieder entnommen. Primär- und Sekundärwicklung sind im allgemeinen konzentrisch angeordnete Zylinder von gleicher Länge. Die Unterspannungswicklung liegt meistens innen nächst dem Eisenkern, die Oberspannungswicklung außen.

Ausgleich- oder Tertiärwicklung heißt eine in sich geschlossene Wicklung, die im allgemeinen keine Leistung nach außen abzugeben hat.

Diejenigen Teile des Eisenkernes, die von den Wicklungen umschlossen sind, heißen Schenkel, die die Schenkel verbindenden Kernbalken Joche.

Die meisten Transformatoren sind in ölgefüllte Kessel eingebaut. Das Öl hat dabei eine doppelte Aufgabe zu erfüllen: es wirkt einmal als ausgezeichnetes Isoliermittel, ferner als Kühlmittel, das die Verlustwärme aus Kern und Wicklungen abführt. Die Wicklungsenden werden mittels Durchführungen isoliert durch den Deckel des Kessels nach außen geführt.

Bei Transformatoren versteht man unter Leistung stets die elektrische Scheinleistung (anzugeben in VA, kVA oder MVA), weil es für die Erwärmung, die der Belastung eine Grenze setzt, gleichgültig ist, in welcher Phasenlage der Strom den Transformator durchfließt. Ist $J$ der Strom in der Wicklung eines Schenkels und $U_p$ die Schenkelspannung, so ist $JU_p$ die Leistung eines Schenkels. Für den Einphasen-Transformator mit 2 bewickelten und hintereinander geschalteten Schenkeln ist die Leistung $N = JU$ ($U = 2\,Up$), für den Drehstrom-Transformator ist $N = 3\,UpJ = JU\sqrt{3}$ ($U = Up\sqrt{3}$).

Bei Mehrwicklungs-Transformatoren errechnet man die dem Zweiwicklungstransformator entsprechende Typenleistung ($N_T$) als halbe Summe der Leistungen der verschiedenen

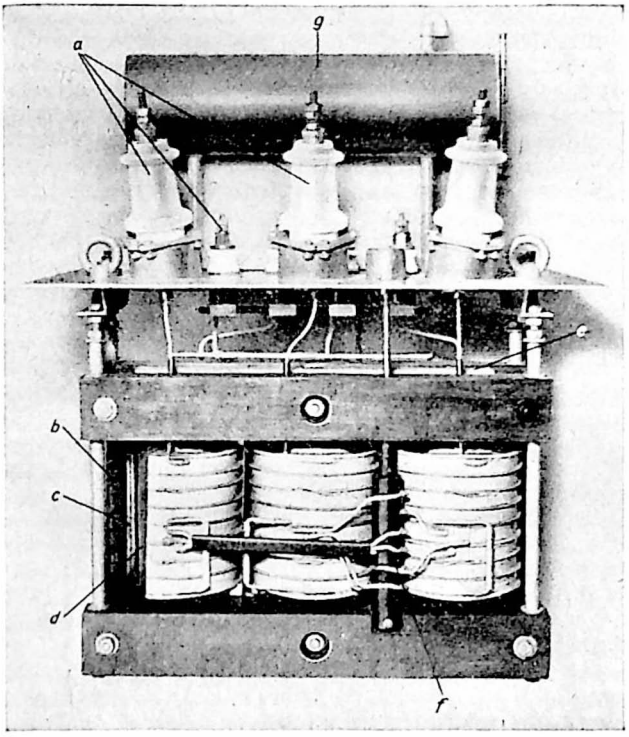



Abb. 1. Drehstrom-Transformator (Wicklung teilweise geschnitten).
*a* Durchführungen, *b* Oberspannungswicklung, *c* Unterspannungswicklung, *d* Kern (Schenkel), *e* Kern (Joch), *f* Umschalter für Oberspannungsanzapfungen, *g* Ausdehnungsgefäß.

Wicklungen: $N_T = \frac{1}{2} \Sigma N_{tc}$, ein Dreiwicklungs-Transformator mit Leistungen von 20, 20 und 10 MVA Wicklungsleistung hat demnach eine Typenleistung von 25 MVA.

Legt man eine Wicklung eines Transformators an Spannung, ohne die andere Wicklung zu belasten, so nimmt der

Transformator den Leerlaufstrom auf, dessen Blind-Komponente der Magnetisierungsstrom ist, unter dessen Wirkung der Eisenkern den magnetischen Fluß ausbildet, der der angelegten Spannung eine gleichgroße elektromotorische Kraft (Gegen-EMK) entgegenstellt. Die durch die wechselnde Magnetisierung des Eisens entstehenden Verluste bilden zusammen mit den Verlusten des Magnetisierungsstromes in der Primärwicklung und den dielektrischen Verlusten die Leerlaufverluste. Da die zweite Wicklung den gleichen magnetischen Fluß umschließt, bildet sich auch in ihr eine EMK aus, die zwischen den Enden der Wicklung als Klemmenspannung erscheint. Das Verhältnis der angelegten Spannung (Primärspannung) zu der an der zweiten Wicklung bei Leerlauf auftretenden Spannung (Sekundärspannung) entspricht ziemlich genau dem Übersetzungsverhältnis des Transformators, das definiert ist als Verhältnis der Windungszahlen von Oberspannungs- und Unterspannungswicklung.

Die Übertragung der Spannung von einer Wicklung zur anderen geschieht also im Transformator mit Hilfe des magnetischen Flusses.

Beim belasteten Transformator muß von der Primär- zur Sekundärwicklung auch eine Stromübertragung stattfinden. Da eine leitende Verbindung zwischen der Primär- und Sekundärwicklung nicht besteht, muß die Stromübertragung induktiv vor sich gehen. Man kann sich die hierbei ablaufenden Vorgänge folgendermaßen klarmachen:

Der die Sekundärwicklung durchfließende Belastungsstrom erzeugt eine magnetomotorische Kraft (MMK), die sich in Amperewindungen (AW) gemessen aus dem Produkt von Sekundärstrom ($J_2$) mal Windungszahl ($w_2$) der Sekundärwicklung ergibt: $AW_2 = J_2 \cdot w_2$. Der Transformator setzt selbsttätig dieser sekundären MMK eine gleichgroße, entgegengesetzt gerichtete MMK durch Ausbildung entsprechender Primär-AW entgegen,

$$AW_1 = J_1 \cdot w_1 = AW_2 = J_2 \cdot w_2 \text{ oder } J_1 = J_2 \frac{w_2}{w_1}, \quad \text{(Gl. 1)}$$

wobei $J_1$ den Magnetisierungsstrom nicht enthält.

Würde sich das AW-Gleichgewicht zwischen Primär- und Sekundärwicklung bei Belastung nicht einstellen, so

wäre ein dem Magnetisierungsfluß überlagerter Fluß die Folge der im einen oder anderen Sinn überwiegenden AW. Dieser Fluß wäre wieder die Ursache von elektromotorischen Kräften in den Wicklungen, die zur Ausbildung von Ausgleichströmen führten, bis das AW-Gleichgewicht wieder hergestellt wäre.

Die gesamte Stromwärmeleistung, die vom Belastungsstrom in den Wicklungen, in den Zuleitungen und Kontakten von Umstellern oder Stufenschaltwerken des Transformators verbraucht wird sowie die von dem nachstehend erwähnten Streufeld in den Wicklungen selbst und in Konstruktionsteilen und im Kessel erzeugten Wirbelstromverluste, stellen die Wicklungsverluste oder Kurzschlußverluste dar.

Hätten Primär- und Sekundärwicklung in radialer Richtung keine Ausdehnung und könnten die Wicklungen abstandslos aufeinander gewickelt werden, so könnte sich, wie bis jetzt angenommen, infolge der entgegengesetzt gleichen AW der beiden Wicklungen kein vom Belastungsstrom herrührender Fluß ausbilden. In Wirklichkeit müssen die beiden Wicklungen eine endliche Breite und aus Isolationsgründen einen endlichen Abstand voneinander haben. Sie schließen einen ringförmigen Spalt zwischen sich ein, in dem sich die Wirkung der AW beider Wicklungen nicht mehr aufhebt, sondern im gleichen Sinn wirkt. Im Spalt zwischen den Wicklungen bildet sich daher ein dem Betriebsstrom proportionaler Fluß aus, der teilweise auch die Wicklungen axial durchsetzt und außerhalb des Spaltes seinen Rückschluß teils durch Öl bzw. Luft, teils durch Kern, Konstruktionsteile und Kessel findet. Dieser Fluß heißt Streufluß. Er verursacht einen dem Belastungsstrom proportionalen inneren Spannungsfall, der die bei Leerlauf auftretende sekundäre Klemmenspannung bei Belastung entsprechend verringert. Dieser Spannungsfall wird Streuspannung genannt. Die geometrische Summe von Streuspannung und Ohmschem Spannungsfall des Nennstromes in den Wicklungen heißt Kurzschlußspannung, weil es die Spannung ist, die man bei kurzgeschlossener Sekundärwicklung an die Primärwicklung legen muß, wenn der Transformator seinen Nennstrom aufnehmen soll.

## 2. Grundgesetze der Transformation

Wird eine Spule mit $w$ Windungen von einem magnetischen Fluß $\Phi$ durchsetzt, der zeitlich veränderlich ist, so wird in der Spule eine EMK $e$ erzeugt, die sich nach den Gesetzen der Induktion errechnet zu

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt} \cdot 10^{-8} \text{ [Volt]}. \qquad \text{(Gl. 2)}$$

Folgt die Änderung von $\Phi$ einem sin-Gesetz ($\Phi = \Phi_{sch} \cdot \sin \omega t$, wobei $\omega$ die Kreisfrequenz $2\pi f$ der harmonischen Schwingung, $f$ die Frequenz, $\Phi_{sch}$ der Scheitelwert des magnetischen Flusses ist), so wird

$$e = -w \cdot \omega \cdot \Phi_{sch} \cdot \cos \omega t \cdot 10^{-8} \text{ [Volt]}$$

oder

$$e = w \cdot \omega \cdot \Phi_{sch} \cdot \sin (\omega t - 90) \cdot 10^{-8} \text{ [Volt]}.$$

Die EMK folgt dem gleichen sin-Gesetz wie der Fluß, eilt diesem jedoch um $90^0$ nach.

Wir können nun noch den Scheitelwert $E_{sch}$ der EMK ermitteln zu

$$E_{sch} = w \cdot \omega \cdot \Phi_{sch} \cdot 10^{-8} \text{ [Volt]}$$

oder

$$E_{sch} = w \cdot 2\pi f \cdot \Phi_{sch} \cdot 10^{-8} \text{ [Volt]}.$$

Der interessierende Wert ist der Effektivwert der EMK $E$, der sich — sin-Form vorausgesetzt — nach den allgemeinen Wechselstromgesetzen aus dem Scheitelwert $E_{sch}$ durch Division durch $\sqrt{2}$ errechnet. Es wird also:

$$E = 4{,}44 \cdot f \cdot w \cdot \Phi_{sch} \cdot 10^{-8} \text{ [Volt]}.$$

Führt man schließlich statt des Flusses $\Phi_{sch}$ noch den geläufigeren Begriff der magnetischen Induktion $B$ ein, wobei $\Phi_{sch} = B \cdot F$ ist ($F$ = Querschnitt des vom Fluß durchsetzten Raumes in $cm^2$), so erhält man die Transformatorengleichung:

$$E = 4{,}44 \cdot f \cdot w \cdot F \cdot B \cdot 10^{-8} \text{ [Volt]}. \qquad \text{(Gl. 2a)}$$

Da wir fast nur mit 50periodigen Netzen zu rechnen haben, kann man endlich noch schreiben:

$$E_{50} = 2{,}22\, w \cdot F \cdot B \cdot 10^{-6} \text{ [Volt]}. \qquad \text{(Gl. 2b)}$$

($B$ ist in Gauß einzusetzen.)

Der magnetische Wechselfluß $\Phi$, über dessen Herkunft bisher noch keine Annahmen getroffen sind, bildet sich, wenn man an die Klemmen der betrachteten Spule eine Wechselspannung legt. Hat die Spule die Induktivität $L_0$, so nimmt sie unter dem Einfluß der Spannung $U$ den Strom $J_\mu = \frac{U}{\omega L_0}$ auf, der als induktiver Strom der angelegten Spannung um $90^0$ nacheilt. $J_\mu$, der Magnetisierungsstrom, erregt in den $w$-Windungen der Spule die magnetomotorische Kraft (MMK) $J_\mu \cdot w$ Amperewindungen (AW), die den Fluß $\Phi$ erzeugen. $\Phi$ wird so groß, daß die von ihm erzeugte EMK $E$ der angelegten Spannung $U$ das Gleichgewicht hält.

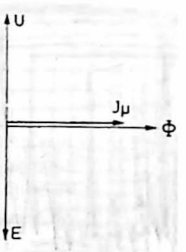


Abb. 2. Leerlauf-Diagramm des verlustlosen Transformators (Windungsverhältnis 1 : 1).

Den Zusammenhang von $U, E, J_\mu$ und $\Phi$ zeigt Abb. 2. Die an die Spule gelegte Spannung $U$ treibt den ihr um $90^0$ nacheilenden Strom $J_\mu$. In Phase mit $J_\mu$ liegt der Fluß $\Phi$. $\Phi$ erzeugt die — wie oben gezeigt — wiederum ihm um $90^0$ nacheilende EMK $E$. Die Summe von $U$ und $E$ ist Null, es herrscht also Gleichgewicht.

Ordnet man eine zweite Spule so an, daß sie ebenfalls mit dem Fluß $\Phi$ verkettet ist, so wird, gleiche Windungszahlen vorausgesetzt, in der zweiten Spule ebenfalls die EMK $E$ erzeugt. Bei verschiedenen Windungszahlen ergibt sich folgendes: Spule 1 habe $w_1$ Windungen, Spule 2 $w_2$ Windungen, Spule 1 werde an die Spannung $U$ gelegt. Es ist nach (2b): $-U = E_1 = w_1 \cdot 2{,}22 \cdot F \cdot B \cdot 10^{-6}$ [Volt], während

$$E_2 = w_2 \cdot 2{,}22 \cdot F \cdot B \cdot 10^{-6} \text{ [Volt]} \quad \text{ist.}$$

Hiernach:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}. \qquad \text{(Gl. 3)}$$

Die in den beiden Spulen induzierten EMKe verhalten sich wie die Windungszahlen der Spulen. Hiermit ist die zweite Transformatorengleichung gefunden.

Das Verhältnis der Windungszahlen ist das Übersetzungsverhältnis des Transformators.

Beim belasteten Transformator muß — vom Eigenverbrauch abgesehen — die eingespeiste (Schein-)Leistung gleich der entnommenen (Schein-)Leistung sein, also $J_1 \cdot E_1 = J_2 \cdot E_2$. Durch Einsetzen von Gl. 3 findet man

$$\frac{J_1}{J_2} = \frac{w_2}{w_1} \quad \text{(Gl. 1 Abschn. 1)},$$

die dritte Transformatorengleichung, die aus der Energiebilanz ebenso folgt, wie sie in Abschn. 1 aus der Notwendigkeit des AW-Gleichgewichts hergeleitet werden konnte. Man kann nun die Grundgesetze der Transformation folgendermaßen zusammenfassen:

Legt man eine Wicklung eines Transformators an Spannung, so wird diese von einem der Spannung nacheilenden Magnetisierungsstrom durchflossen. Dieser erzeugt einen mit dem Magnetisierungsstrom gleichphasigen magnetischen Fluß. Die in der zweiten Wicklung erzeugte EMK verhält sich zur angelegten Spannung wie die Windungszahlen. Die die Wicklungen durchfließenden Belastungsströme verhalten sich umgekehrt wie die Windungszahlen.

### 3. Magnetisierung des Eisenkernes und Eisenverluste

Der Eisenkern erfüllt im Transformator mehrere Aufgaben. Mechanisch ist er der Träger der Wicklungen, die sich gegen ihn abstützen. Elektrisch ist er — und das ist seine wichtigste Eigenschaft — der Träger des magnetischen Flusses, der die Übertragung der Spannung von der Primär- zur Sekundärwicklung bewirkt. Schließlich leitet er in den Jochteilen den Magnetfluß in einer vorgeschriebenen Bahn von Schenkel zu Schenkel.

Zur Magnetisierung des Eisenkernes muß elektrische Energie aufgewandt werden, die Magnetisierungsleistung. Diese besteht aus einer Blindleistungskomponente, die für die Größe des magnetischen Flusses bestimmend ist, und einer Wirkkomponente, die hauptsächlich daher rührt, daß im Eisen die Erzeugung eines Wechselflusses nur unter Aufwand von Verlustarbeit möglich ist. Ein verschwindend kleiner

Teil der bei Leerlauf vom Transformator angeforderten und an den Klemmen zu messenden Wirkleistung ist schließlich bedingt durch die Verlustwärme, die der Magnetisierungsstrom in der Primärwicklung des Transformators erzeugt, und durch die ebenfalls geringen dielektrischen Verluste.

Eine genauere physikalische Betrachtung der bei Magnetisierung des Eisenkernes auftretenden Verhältnisse ergibt folgendes Bild:

Der Eisenkern setzt dem Durchtritt des magnetischen Flusses $\Phi$ einen Widerstand entgegen, der der Länge des Kraftlinienweges ($l$) proportional und dem Querschnitt des Eisenkernes ($F$) umgekehrt proportional ist. Der magnetische Widerstand als Materialeigenschaft ist ferner von der Induktion des Eisens $B = \frac{\Phi}{F}$ abhängig. Die magnetomotorische Kraft (MMK), die den Magnetfluß durch den Eisenkreis treibt, ist der Magnetisierungsstrom $J_\mu$, multipliziert mit der Windungszahl $w$ der an Spannung gelegten Wicklung; sie wird in Amperewindungen (AW) ausgedrückt.

Um allgemein gültige Beziehungen zu bekommen, wird im folgenden statt mit der MMK und dem Fluß mit spezifischen Werten gerechnet, nämlich mit der MMK pro cm Länge des Kraftlinienweges (AW/cm) = Feldstärke H und der Induktion ($B$), d. h. dem Fluß pro cm² Kernquerschnitt $\frac{\Phi}{F}$. Zwischen diesen beiden Größen besteht ein durch die physikalischen Eigenschaften des Eisens gegebener Zusammenhang, der in Abb. 3 als $B = f(\mathrm{AW/cm})$ dargestellt ist. Mit Hilfe dieser Kurve, in der die Scheitelwerte der Induktion [$\hat{B}$] in Abhängigkeit vom Effektivwert der magnetisierenden AW/cm dargestellt sind, lassen sich nun für jeden Eisenkern die Magnetisierungsströme ermitteln, wenn Windungszahl und Spannung der magnetisierenden Wicklung gegeben sind. Man errechnet nach Gleichung 2a aus Spannung, Windungszahl und Kernquerschnitt die Induktion $B$, ermittelt aus der Kurve (Abb. 3) die zugehörigen A/cm gleichbedeutend AW/cm, aus denen man dann den Magnetisierungsstrom errechnet nach

$$J_\mu = \frac{AW/cm \cdot l_{cm}}{w} [A], \qquad \text{(Gl. 4)}$$

wobei $l_{cm}$ die mittlere Länge des Kraftlinienpfades im Eisenkern ist ($J_\mu$ als Effektivwert).

Wird ein Transformator von einer sin-förmigen Spannung erregt, so muß der die Gegen-EMK liefernde Fluß ebenfalls sin-förmig verlaufen, d. h. auch die Induktion verändert sich sin-förmig. Man ermittelt nach Abb. 4a Punkt für Punkt für die verschiedenen Zeitwerte der Induktion die jeweils

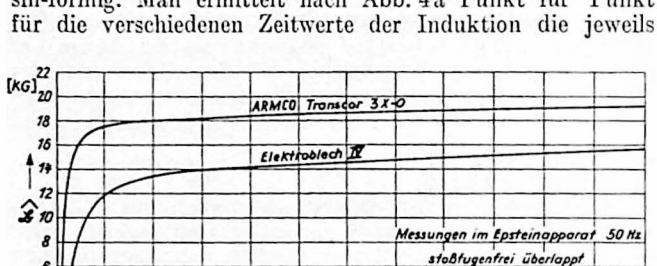



Abb. 3. Magnetisierungskurve für Transformatoren-Blech.

zugehörigen Werte der AW/cm und damit die dieser Größe proportionalen Werte des Magnetisierungsstromes. In Abb. 4a links sind auf der Abszisse Augenblickswerte und nicht wie in Abb. 3 Effektivwerte des Stromes aufgetragen. Man verfährt dabei wie folgt: Von irgendeinem Punkt ($A$) der sin-förmigen Spannungs-, Fluß- oder Induktionslinie geht man in Pfeilrichtung zur Magnetisierungslinie hinüber ($B$). Dadurch findet man den zu $B$ gehörigen Augenblickswert des Magnetisierungsstromes ($C$), den man über $C'$ in das Ausgangsdiagramm überträgt ($D$). Man findet so für jeden Zeitwert der Spannung den zugehörigen Zeitwert des Magnetisierungsstromes. Hierbei stellt man fest, daß der Magnetisierungsstrom eine von der sin-Linie abweichende Gestalt hat.

Er enthält Oberwellen, und zwar, wie die Analyse zeigt (Abb. 4b), alle ungeradzahligen Vielfache der Grundwelle. Die Amplituden dieser Oberwellen fallen stark mit steigender Ordnungszahl der Oberwellen.

Mit wachsender Induktion nimmt entsprechend der Form der Magnetisierungscharakteristik (Abb. 3) die zur Magnetisierung notwendige AW-Zahl und damit der Magnetisierungs-

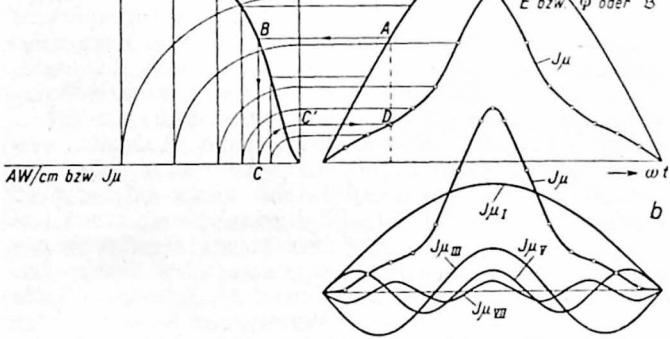



Abb. 4. Form des Magnetisierungsstromes. *a* Konstruktion des Magnetisierungsstromes aus Spannungskurve und Magnetisierungskennlinie. *b* Zerlegung des Magnetisierungsstromes in Grundwelle und Oberwellen.

strom stark zu, und die Kurvenform des Magnetisierungsstromes verzerrt sich ebenfalls immer stärker.

Kleiner Kernquerschnitt und geringe Windungszahl bedeuten wenig Materialverbrauch, aber hohen Leerlaufstrom und große Verzerrung durch höhere Harmonische. Großer Kernquerschnitt und große Windungszahl machen den Transformator schwer und teuer, bringen aber kleinen Leerlaufstrom und annähernd sin-förmige Kurvenform des Leerlaufstromes mit sich. Man muß also Kernabmessungen und Windungszahlen so wählen, daß die Induktion nur Werte erreicht, bei denen der Magnetisierungsstrom, der klein sein soll im

Verhältnis zum Nennstrom des Transformators, in erträglichen Grenzen bleibt, desgleichen die Oberwellen im Magnetisierungsstrom, trotzdem aber der Materialaufwand für Kern und Wicklung noch wirtschaftlich tragbar ist. Die meisten ausgeführten Transformatoren arbeiten mit Induktionen zwischen 13000 und 17000 Gauß.

Die wechselnde Magnetisierung des Eisens ist von Verlusten begleitet, die im folgenden näher untersucht werden sollen. Die Magnetisierungslinie hat bei steigender und sinkender Magnetisierung einen verschiedenartigen Verlauf, so daß z.B. in dem Augenblick, in dem der fallende Magnetisierungsstrom durch Null geht, noch ein Restmagnetismus vorhanden ist, die Remanenz. Erst durch Aufwand von Gegen-AW kann die Induktion wieder auf den Wert Null gebracht werden und darüber hinaus negative Werte annehmen. Abb. 5 zeigt den Verlauf der Induktion ($B$) als Funktion der Feldstärke oder der MMK (AW/cm). Für eine volle Periode des Magnetisierungsstromes ergibt sich ein schleifenförmiger Linienzug, die Hysteresisschleife. Der Flächeninhalt der Hysteresisschleife stellt den Energieverlust dar, der für die Ummagnetisierung in jeder Periode aufgebracht werden muß.

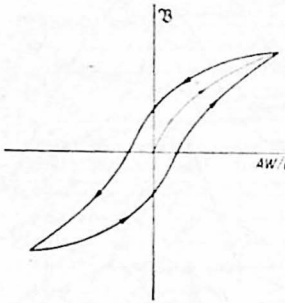


Abb. 5. Hysteresis-Schleife.

Wir vergewissern uns von der Dimension der Hysteresisfläche durch folgende Überlegung: Jedes Flächenelement hat die Dimension $dB \cdot$ AW/cm; da das Differential der Induktion ($dB$) proportional ist $e \cdot dt/cm^2$ (s. Gleichung 2, $d\Phi = dB \cdot F$), die Feldstärke (AW/cm) dem Magnetisierungsstrom pro cm ($i/cm$) proportional ist, hat die Hysteresisfläche die Dimension $e \cdot i \cdot dt/cm^3$, d. h. die Dimension einer Arbeit pro Volumeneinheit. Diese Arbeit tritt in Gestalt von Wärme in Erscheinung.

Der Flächeninhalt der Hysteresisschleife, d. h. die Verlustwärme bei einer Ummagnetisierung, ist abhängig von der Art des verwendeten Eisens und der Höhe der Induktion. Sie steigt in ziemlich guter Annäherung mit dem Quadrat der Induktion. Die Verlustleistung, d. h. die Verlustarbeit pro $s$, ist der Anzahl der Ummagnetisierungen pro $s$, d. h. der Periodenzahl ($f$) des Magnetisierungsstromes, proportional. Die Hysteresisverluste $p_h$ sind zu ermitteln nach der Beziehung:

$$p_h = v_h \frac{f}{100} \left(\frac{B}{10.000}\right)^2 [\text{Watt/kg}]. \qquad \text{(Gl. 5)}$$

Die Materialkonstante $v_h$ hat bei guten, hochlegierten Blechen etwa den Zahlenwert 1,5...2, bei gewöhnlichem Dynamoblech etwa den Wert 4, bei kornorientiertem Blech ca. 0,4.

Die Hysteresisverluste sind nicht die einzigen im Eisenkern auftretenden Verluste. Da das Eisen leitend ist, können sich in ihm selbst infolge der Flußänderungen genau wie in den den Kern umgebenden Wicklungen Ströme ausbilden. die in Ebenen senkrecht zu den Kraftlinien im Eisenkern kreisen. Diese Ströme heißen Wirbelströme. Sie wirken der Magnetisierung entgegen und erfordern daher zum Ausgleich zusätzlichen Magnetisierungsstrom; ferner erzeugen sie im Eisen Ohmsche Verluste, die Wirbelstromverluste.

Um die Wirbelströme so klein wie möglich zu halten, baut man den Eisenkern der Transformatoren aus geschichteten, gegeneinander isolierten Blechen auf, die in Längsrichtung vom Fluß durchsetzt werden. Da nunmehr die Ebene senkrecht zum Fluß, d. h. der Kernquerschnitt, keine leitend zusammenhängende Fläche mehr bildet, bleibt die Wirbelstrombildung auf die einzelnen Teilbleche des Kernes beschränkt. Im einzelnen Blech ist aber die EMK wegen des kleinen Teilflusses, der das Blech durchsetzt, klein und der Weg des Wirbelstromes, der hauptsächlich längs der Oberfläche des Bleches fließt, verhältnismäßig groß, die Wirbelstromverluste bleiben also klein.

Die im Transformatorenbau verwandten Bleche haben eine Stärke von 0,5—0,35 mm. Sie werden durch Lackierung

voneinander isoliert. Die elektrische Leitfähigkeit des Eisens soll mit Rücksicht auf die Wirbelstromverluste möglichst klein sein, was durch Legierung mit Silizium erzielt wird. Die Größe der Wirbelströme ist abhängig von der Materialkonstanten und den Abmessungen der Bleche, weiterhin proportional der Induktion und der Frequenz. Da die Wirbelstromverluste mit dem Quadrat der Wirbelströme wachsen, sind sie dem Quadrat von Induktion, Frequenz und Blechdicke proportional. Man ermittelt die Wirbelstromverluste ($p_w$) nach:

$$p_w = v_w \cdot \left(\frac{f}{100}\right)^2 \cdot \left(\frac{B}{10.000}\right)^2 [\text{Watt/kg}]. \qquad \text{(Gl. 6)}$$

Die Materialkonstante $v_w$ bewegt sich je nach der Güte und Stärke des Bleches zwischen ca. 6 für 0,5 mm Dynamoblech und 0,6 für 0,35 mm hochlegiertes Blech, 0,8 für kornorientiertes Blech.

Für die gesamten Eisenverluste pro kg kann man demnach schreiben:

$$p_{fe}/\text{kg} = \left(v_h \frac{f}{100} + v_w \left(\frac{f}{100}\right)^2\right) \cdot \left(\frac{B}{10.000}\right)^2 [\text{Watt/kg}], \quad \text{(Gl. 7)}$$

oder für $f = 50$

$$p_{fe}/\text{kg} = (0{,}5 \cdot v_h + 0{,}25\, v_w) \left(\frac{B}{10.000}\right)^2$$

$$= v_{10} \left(\frac{B}{10.000}\right)^2 [\text{Watt/kg}]. \qquad \text{(Gl. 7a)}$$

bzw.
$$p_{fe} = v_{10} \cdot G_{fe} \cdot \left(\frac{B}{10.000}\right)^2 [\text{Watt}], \qquad \text{(Gl. 7b)}$$

wenn das Eisengewicht $G_{fe}$ in kg eingesetzt wird.

Die Verlustziffer ($v_{10}$) guter, hochlegierter Bleche für eine Induktion von 10000 Gauß und 50 Perioden beträgt 0,9—1,0 Watt/kg.

In neuester Zeit werden die in Amerika entwickelten kornorientierten Transformatorenbleche auch in Europa in größtem Maße verwendet. Ihre technisch-wirtschaftliche Bedeutung liegt darin, daß kornorientierte Bleche mit in Walzrichtung orientierten Kristallen sehr kleine Verluste haben und einen geringeren Magnetisierungsstrom brauchen als normale

Transformatorenbleche. Als Verlustziffer kann man bei diesen Blechen $v_{10} = 0{,}4$—$0{,}5$ W/kg einsetzen, wobei sich bei einer Induktion von 15000 Gauß $v_{15} =$ ca. 1,13 W/kg ergibt. Man kann die günstigen Eigenschaften der kaltgewalzten Bleche entweder dazu verwenden, Transformatoren mit geringsten Eisenverlusten zu bauen oder durch Erhöhung der Induktion und Beibehaltung der üblichen Verluste den Kernquerschnitt zu verkleinern und damit Abmessungen, Gewicht und Preis des ganzen Transformators zu verringern.

Zu beachten ist, daß kornorientierte Bleche ihre hervorragenden Eigenschaften nur in der Walzrichtung haben. Bei der Konstruktion des Kernes ist also darauf zu achten, daß der Fluß die Bleche möglichst nur in der Vorzugsrichtung durchsetzt. Die Bleche sind weiterhin empfindlich gegen Verformung und Druck, so daß sie nach dem Bearbeitungsprozeß spannungsfrei geglüht werden müssen, damit sie ihre ursprünglichen Werte wieder erreichen.

Wir fassen zusammen:

Der Magnetisierungsstrom eines Transformators besteht aus einer Grundwellenkomponente und Strömen der ungeradzahligen höheren Harmonischen. Der Strom der Grundwelle zerfällt wiederum in eine der angelegten Spannung um 90° nacheilende Blindkomponente und eine Wirkkomponente, welche die Verluste im Eisen und die verschwindend kleinen Verluste des Magnetisierungsstromes in der Primärwicklung sowie die dielektrischen Verluste deckt.

### 4. Streuung

Der vom Magnetisierungsstrom erzeugte Nutzfluß ist nicht der einzige Fluß, der im Transformator auftritt. Auch der Laststrom in Primär- und Sekundärwicklung weckt magnetomotorische Kräfte, die zur Ausbildung von Flüssen führen. Zwar sind die primären und sekundären AW des Laststromes entgegengesetzt gleich groß (Gl. 1) und heben sich für alle Kraftlinienwege auf, die beide Wicklungen gemeinsam umschlingen. Es gibt aber auch Wege für Kraftlinien, die jeweils nur mit einer Wicklung verkettet sind. Abb. 6 zeigt den Verlauf solcher Kraftlinien. Hier können die AW

der anderen Wicklung nicht kompensierend wirken, und es kommt also zur Bildung eines magnetischen Flusses. Kennzeichnend für diesen, vom Laststrom erzeugten und ihm proportionalen Fluß ist, daß er den ringförmigen Raum zwischen den beiden Wickelzylindern durchsetzt. Oben und unten tritt er aus seinem Kanal aus und sucht seinen Rückschluß innen über den Schenkel; außen steht ihm der ganze Raum um die Wicklung zur Verfügung, wobei Spannbolzen zwischen Ober- und Unterjoch sowie andere eiserne Konstruktionsteile und der Kessel als Rückschlußweg bevorzugt werden.

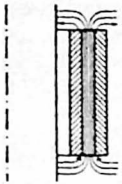


Abb. 6. Verlauf der Streukraftlinien bei Zylinderwicklung.

Der soeben beschriebene Fluß heißt Streufluß. Er verleiht dem belasteten Transformator die Eigenschaft einer Drosselspule, denn er erzeugt in Primärwicklung und Sekundärwicklung einen induktiven Spannungsfall, um den sich bei Belastung die sekundäre Leerlaufspannung verringert.

Da die Streuung für die Betriebseigenschaften des Transformators von Wichtigkeit ist, weil sie eine der Hauptgrößen des Transformators, die Klemmenspannung, beeinflußt, muß sie quantitativ genau untersucht werden.

Wir überlegen folgendermaßen (Abb. 7):

Der AW-Druck an der Innenseite des dem Schenkel benachbarten Wickelzylinders und damit auch die Induktion $B_s$ soll Null sein, weil sich für diesen Punkt Primär- und Sekundär-AW aufheben. Die Induktion steigt dann vom Innen- zum Außenrand des Zylinders stetig an (genau genommen in treppenförmigen Absätzen entsprechend der Zahl der radial aufeinander gewickelten Drähte der Wicklung). Im Spalt zwischen den beiden Wicklungen hat sie ihr Maximum und fällt dann wieder vom Innen- bis zum Außenrand des äußeren Wickelzylinders auf Null.

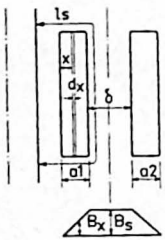



Abb. 7. Ermittlung der Streuung bei Zylinderwicklung.

Die maximale Induktion $B_s$ des Streufeldes errechnet sich aus der magnetomo-

torischen Kraft AW $= J \cdot w$ nach der Formel:

$$B_s = \frac{4\pi \cdot J \cdot w}{10 \cdot l_s} \cdot \sqrt{2}, \qquad \text{(Gl. 8)}$$

worin $J \cdot w = J_1 \cdot w_1 = J_2 \cdot w_2$ ist und $l_s$ die wirksame Länge des Kraftlinienwegs in cm.

Über die in dieser Gleichung enthaltene mittlere Weglänge der Streulinien ($l_s$) müssen nun noch Annahmen getroffen werden. Da im Innern der Wicklung für die eine Hälfte des Streuflusses ein mit Eisen gefüllter Raum, der Schenkel, zur Verfügung steht, für die zweite Hälfte des Streuflusses der gesamte Raum um die äußere Wicklung, kann man in guter Näherung sagen, daß der Widerstand des Streuflusses hauptsächlich im Spalt zwischen beiden Wicklungen liegt und die Wicklungshöhe demnach die Strecke ist, auf der die MMK verbraucht wird. Man setzt deshalb für $l_s$ die Länge einer Kraftlinie ein, die längs des Wickelzylinders von der unteren bis zur oberen Kante verläuft. Genau genommen ist dieser Wert für $l_s$ zu klein, weil auf dem Rückschlußweg auch noch ein, wenn auch kleiner Teil der MMK verbraucht wird. Nach Rogowski erhält man genaue Werte für die wirksame Länge des Kraftlinienweges, wenn man $l_s$ aus der Gleichung

$$l_s = \frac{l}{k} \qquad \text{(Gl. 9)}$$

errechnet. $l$ ist dabei die Länge des Wickelzylinders, $k$ ein Faktor, der gleich oder kleiner als 1 sein muß und errechnet werden kann aus

$$k = 1 - \frac{b}{\pi l}\left(1 - e^{-\frac{\pi l}{b}}\right). \qquad \text{(Gl. 9a)}$$

Hierin bedeuten:

$b = \delta + a_1 + a_2$ (vgl. Abb. 7)
$l$ die Länge des Wicklungszylinders und
$e$ die Basis der nat. Logarithmen.

Für $\frac{b}{\pi l} \leqq 0{,}3$, was für Zylinderwicklung wohl immer zutreffen wird, läßt sich obige Gleichung vereinfachen zu

$$k \sim 1 - \frac{b}{\pi l} \text{ oder } l_s \sim l + \frac{b}{3} \qquad \text{(Gl. 9b)}$$

Die damit errechneten Werte für $l_s$ sind befriedigend.

Von Interesse ist nun der Spannungsfall, den der Streufluß verursacht: Die Streuspannung.

Ist $l_u$ der mittlere Umfang des zylindrischen Raumes zwischen den Wicklungen — des Streukanals —, so ist, wenn der Kanal die Breite $\delta$ hat,

$$B_s \cdot l_u \cdot \frac{\delta}{2}$$

der Streufluß, der mit allen Windungen jeder Wicklung verkettet ist. Die hierbei getroffene Annahme, daß sich der Streufluß je zur Hälfte $\left(\frac{\delta}{2}\right)$ mit Primär- und Sekundärwicklung verkettet, ist zwar willkürlich, aber zulässig, weil die Streuspannung nur in ihrer Summenwirkung auf beide Wicklungen in Erscheinung tritt. Tatsächlich wenden sich 60—80% des Flusses dem Kern zu, der Rest umschließt die äußere Spule. Da die Wicklung selbst aber auch noch von Streulinien axial durchsetzt wird, müssen diese ebenfalls berücksichtigt werden. Bei völlig gleichmäßiger Stromdurchflutung der Wicklung ist an der Stelle $x$ der Wicklung die Induktion:

$$B_x = B_s \frac{x}{a};$$

der in der Wicklung bis $x$ verlaufende Fluß ist:

$$\frac{B_s + B_x}{2} (a - x) \cdot l_u.$$

Da $l_u$ wie oben definiert eingesetzt ist, gilt der Wert nur als Mittelwert für die innere und äußere Wicklung.

Der Wickelzylinder an der Stelle $x$ mit der Breite $d_x$ hat

$$w \frac{d_x}{a} \text{ Windungen}$$

und ist außer mit dem Fluß des Streukanals mit den vorher ermittelten

$$\frac{B_s + B_x}{2} (a - x) l_u \text{ Linien verkettet.}$$

Die ganze Verkettung innerhalb der Wicklung ist demnach

$$\int_0^a \frac{B_s + B_s \frac{x}{a}}{2} (a - x)\, l_u \cdot w \frac{d_x}{a}.$$

Die Integration führt zu dem Ausdruck

$$B_s \cdot l_u \frac{a}{3} \cdot w.$$

Einschließlich des halben Flusses im Streukanal ist also im Mittel jede Windung verkettet mit

$$B_s \cdot l_u \frac{\delta}{2} + B_s \cdot l_u \cdot \frac{a}{3} \text{ Linien.}$$

Die Verkettungszahl jeder Wicklung ist

$$B_s \cdot l_u \cdot w \left(\frac{\delta}{2} + \frac{a}{3}\right),$$

wobei $\frac{\delta}{2} + \frac{a}{3}$ die halbe fiktive Spaltbreite ist.

Nach außen tritt nun nur die Summe des Einflusses der Streuung auf Primär- und Sekundärwicklung in Erscheinung. Haben die Wicklungen die Breite $a_1$ und $a_2$, so ist die fiktive Spaltbreite

$$\delta' = \delta + \frac{a_1 + a_2}{3},$$

die Totalverkettung des Transformators

$$\Phi_s \cdot w = B_s \cdot l_u \cdot w \cdot \delta'.$$

Die Streuspannung errechnet sich dann zu (vgl. Gl. 2 u. 2a)

$$U_x = 4{,}44 \cdot f \cdot B_s \cdot l_u \cdot w \cdot \delta' \cdot 10^{-8} \text{ [V]}$$

oder, wenn für $B_s$ noch der Wert nach Gl. 8 eingesetzt wird,

$$U_x = 4{,}44 \cdot f \frac{4\pi \cdot J \cdot w \cdot \sqrt{2}}{10 \cdot l_s} \cdot l_u \cdot w \cdot \delta' \cdot 10^{-8} \text{ [V]} \text{ (Gl. 10)}$$

$$U_{x_{50}} = 3{,}95\, J \cdot w^2 \cdot \frac{l_u}{l_s} \cdot \delta' \cdot 10^{-6}\ [\mathrm{V}] \qquad \text{(Gl. 10a)}$$

für 50 Hz. Für $J$ und $w$ werden zusammengehörige Werte eingesetzt, je nachdem man die Streuspannung auf die Primär- oder Sekundärwicklung des Transformators beziehen will.

Für die Streuinduktivität $L_s = \dfrac{U_x}{J \cdot 2\pi f}$ kann man schließlich schreiben:

$$L_s = 1{,}26 \frac{l_u}{l_s} \cdot w^2 \left(\delta + \frac{a_1 + a_2}{3}\right) \cdot 10^{-8}\ [H]. \qquad \text{(Gl. 11)}$$

Meist wird die Streuspannung in % der Nennspannung ausgedrückt, $u_x$. Führen wir die Windungsspannung $u_w$ ein, die Gesamtspannung $U = u_w \cdot w$ und die Leistung des Schenkels $N_s = J \cdot U$, so wird

$$u_x = 3{,}95 \cdot \frac{N_s}{u_w^2} \cdot \frac{l_u \cdot \delta'}{l_s} \cdot 10^{-4}\ [\%] \text{ für 50 Hz.} \qquad \text{(Gl. 12)}$$

Eine häufig gebrauchte Größe ist die Streureaktanz $X_s$ eines Transformators, die man entweder aus der Formel

$$X_s = \frac{U_x}{J} \text{ ermitteln kann,}$$

oder, wenn $u_x$, Spannung $U$ in kV und Leistung $N$ in kVA des Trafos bekannt sind, nach

$$X_s = 10 \cdot u_x \frac{U_{kV}^2}{N_{kVA}}\ [\mathrm{Ohm}]. \qquad \text{(Gl. 13)}$$

Bei gegebener Leistung eines Transformators stehen nach (Gl. 1) zwei Möglichkeiten offen, um die Streuung zu verändern: Änderung der Windungsspannung, d. h. bei gegebenem Kernquerschnitt Änderung der Induktion oder Änderung der magnetischen Leitfähigkeit des Spaltes. Da die Spaltbreite durch die Isolation zwischen den Wicklungen meist vorgeschrieben ist, läuft die Änderung der Streuung nach der 2. Methode meist auf eine Veränderung der Schenkellänge (und damit $l_s$) hinaus. Wir merken uns folgende Regel:

Bei gegebener Leistung hat ein hochgesättigter langschenkliger Trafo kleine Streuung und umgekehrt ein schwach gesättigter, niedriger Trafo große Streuung.

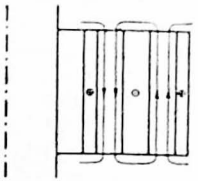


Abb. 8. Verlauf der Streukraftlinien bei doppeltkonzentrischer Wicklung.

Eine einschneidende Veränderung der Streuverhältnisse läßt sich schließlich noch auf einem dritten Weg erzielen, der aber in den Aufbau der Wicklung erheblich eingreift: Durch Anwendung einer doppelt-konzentrischen Wicklung. Man teilt Primär- oder Sekundärwicklung in zwei Zylinder, die den dritten Wickelzylinder beiderseits umschließen (Abb. 8). Dadurch entstehen 2 Streuspalte. Die mittlere Wicklung entfaltet zwar den vollen AW-Druck wie bei einfach-konzentrischer Wicklung, aber ihre Streukraftlinien werden auf beiden Seiten der Wicklung in einen Streukanal gepreßt und $l_s$, die mittlere Länge der Kraftlinien im Gebiet hohen magnetischen Widerstandes, hat sich also verdoppelt, so daß der Streufluß nur halb so groß ist wie bei einfach-konzentrischer Wicklung. Für die geteilte Wicklung gilt, daß jede Hälfte nur mit dem halben AW-Druck auf den Streukanal wirkt, dementsprechend also auch nur den halben Streufluß ausbildet. Die Streureaktanz geht also bei doppeltkonzentrischer Wicklung auf etwa die Hälfte zurück.

Da wegen Rückganges der Breite der geteilten Wicklung auch die reduzierte Spaltbreite $\delta'$ (Gl. 12) kleiner wird, sinkt bei doppelt-konzentrischer Wicklung die Streureaktanz sogar unter die Hälfte des Wertes bei einfach-konzentrischer Anordnung.

Da seit Einführung der Stell-Transformatoren keine zwingende Notwendigkeit zum Bau von Transformatoren mit kleiner Streuspannung mehr besteht, im Gegenteil die Streureaktanz als billiger Kurzschlußschutz für die hinter dem Transformator liegenden Netze und Apparate angesehen wird, tritt die doppelt-konzentrische Wicklung mehr und mehr zurück. Sie ist nur bei Transformatoren höchster Leistung und Spannung gelegentlich noch anzutreffen.

Bei der Berechnung des Spannungsfalls, der in einem Stromversorgungssystem infolge der Streuung des Transformators entsteht, kann man zu der Vorstellung greifen, der streuungsfreie Transformator mit seinem Leerlaufübersetzungsverhältnis sei in Reihe geschaltet mit einer Induktivität, deren Größe nach Gleichung 11 oder Gleichung 13 zu ermitteln ist. Der Spannungsabfall an dieser Induktivität ist dann vektoriell von der Leerlauf-Klemmenspannung abzuziehen, um die wahre Klemmenspannung des belasteten Transformators, bei Vernachlässigung der ohmschen Komponente, zu erhalten.

### 5. Stromkräfte in der Wicklung

Die vom Strom durchflossenen Leiter der Wicklung sind Kräften, die in verschiedenen Richtungen auf sie einwirken, unterworfen. Bleiben diese Kräfte auch bei Nennstrom des Transformators in leicht zu beherrschenden Grenzen, so steigen sie wegen der quadratischen Stromabhängigkeit im Kurzschlußfall so stark an, daß die Abstützung der Windungen und die Verspannung der Wicklung zum schwierigsten mechanischen Problem des Transformatorenbaues wird.

Die Ursache für die Entstehung dieser Kräfte ist, daß sich die stromdurchflossenen Leiter im Raum des magnetischen Streufeldes befinden. Für ihre genaue Berechnung müssen die dafür gültigen Gesetze von Biot-Savart herangezogen werden. Dabei ist eine genaue Kenntnis des Streufeldverlaufes erforderlich. Das Streufeld hat neben einer axialen Komponente, was die Radialkräfte in den Wicklungen hervorruft, auch eine radiale Komponente, was die Axialkräfte hervorruft.

Die Axialkräfte suchen die Wicklungen zusammenzudrücken, wodurch im Wickelzylinder axiale Druckkräfte auftreten, die innerhalb der Wicklung selbst ihren Ausgleich finden, vom Wickelkupfer, der Isolation und den Distanzstücken aufgenommen werden müssen und keiner äußeren Stützkonstruktionen zum Abfang bedürfen. Der Sinn der schweren Preßkonstruktionen, welche die Wicklungen axial unter Druck halten, ist die Verhinderung von

Vibrationen der Windungen unter dem Einfluß der Kurzschlußkräfte, weil hierdurch die Isolation durchgescheuert werden kann. Die Vorpressung muß also größer sein als die axiale Kontraktionskraft.

Der zwischen den Wickelzylindern verlaufende Streufluß (vgl. Abschn. 4) versucht seinen Kanal zu vergrößern, übt also Radialkräfte aus, die so wirken, als ob der äußere Zylinder ein Rohr unter Innendruck, der innere Zylinder ein Rohr unter Außendruck wäre. Diese Kräfte müssen ebenfalls vom Leitermaterial selbst aufgenommen werden, das im äußeren Zylinder auf Zug, im inneren auf Druck beansprucht wird.

Haben schließlich die konzentrischen Wickelzylinder ungleiche Längen — gemessen über die vom Strom durchflossenen Leiter —, so treten auch noch Kräfte auf, die beide Zylinder axial auseinander schieben wollen, Kräfte, die von den Stützkonstruktionen an den Enden der Wicklungen aufgenommen werden müssen (Abb. 10).

Zur rechnerischen Ermittlung der Kräfte kann man wie folgt verfahren:

Nennt man die Kraft, die eine Wicklung in axialer Richtung zusammenpreßt, $P_l$ und nimmt man an, daß der Wickelzylinder mit der Länge $l$ durch $P_l$ um das Stück $dl$ verkürzt wird, so ist die hierbei aufgewandte Arbeit $P_l \cdot dl$ cmkp, wenn $P_l$ in kp, $l$ in cm gemessen wird. Diese Arbeit wird dem magnetischen Feld entnommen, das ja die Ursache der Pressung ist. Bezeichnet man den Energieinhalt des Streufeldes mit $A$ und mit $dA$ das Arbeitsdifferential bei der Kürzung der Wicklung um $dl$, so muß gelten

$$P_l \cdot dl = dA.$$

Der Energieinhalt eines Magnetfeldes ist nun

$$A = \tfrac{1}{2}\, i^2\, L,$$

wenn $i$ der Augenblickswert des Stromes, $L$ die Induktivität der feldbildenden Wicklung, im vorliegenden Fall also die Streuinduktivität $L_s$ ist. Nimmt man an, daß jede Wicklung nur mit der Hälfte der Streu-Kraftlinien verkettet ist, so darf man zur Ermittlung der Kraft $P_l$, die auf eine Wicklung wirkt, auch nur mit $\frac{1}{2} L_s$ rechnen. Es wird dann die größte

Kraft im Verlauf einer Halbperiode, die beim Scheitelwert des Stromes vom Effektivwert $J$ auftritt ($i = J \cdot \sqrt{2}$),

$$P_l = \frac{dA}{dl} = \frac{1}{2} J^2 \frac{dL_s}{dl}.$$

Den Wert für $L_s$ gibt Gl. 11. Setzt man $l = l_s$, so wird

$$\frac{dL_s}{dl} = (-)\frac{L_s}{l_s} \text{ und somit}$$

$$P_l = \frac{1}{2} \cdot \frac{L_s}{l_s} J^2 \text{ [Ws/cm] oder}$$

$$P_l = 5{,}1\, J^2 \frac{L_s}{l_s} \text{ [kp]}. \qquad \text{(Gl. 14)}$$

$J$ ist in $A$, $L_s$ in $H$ und $l_s$ in cm einzusetzen.

Bei Kurzschluß ist für $J$ der Effektivwert des Kurzschlußstromes $J_k$ einzusetzen. Da man im ungünstigsten Fall auch noch mit einem Gleichstromglied des Kurzschlußstromes (s. Abschn. 20) rechnen muß, das ohne Berücksichtigung der Dämpfung die Größe der Amplitude von $J_k$ in der ersten Halbwelle verdoppelt, tatsächlich aber wegen der im Kurzschlußkreis liegenden Widerstände höchstens den 1,8fachen Wert ergibt, ist die höchstmögliche Druckkraft im Kurzschluß $1{,}8^2$ mal größer als $P_l$, also

$$P_{l_k} = 16{,}5 \cdot J_k^2 \cdot \frac{L_s}{l_s} \text{ [kp]}. \qquad \text{(Gl. 14a)}$$

Diese Formel ist unter der Annahme abgeleitet, daß der Streufluß je zur Hälfte die beiden Wicklungen umschlingt. In Abschnitt 4 ist schon darauf hingewiesen, daß die dem Schenkel benachbarte Spule von einem erhöhten Teil des Streuflusses umschlungen ist. Auch längs des Spulenumfangs wird man nicht mit gleichmäßiger Streuflußverteilung rechnen dürfen, weil die Jochbalken dem Fluß eine widerstandsärmere Wegstrecke anbieten. Man muß also stellenweise mit Axialkräften rechnen, die über den mit Gl. 14 errechneten Werten liegen, und muß sich in kritischen Fällen zur Berechnung dieser Kräfte ein genaues Bild der Streuflußverteilung verschaffen.

In gleicher Weise können die Kräfte $P_r$ ermittelt werden, die in radialer Richtung auf die Wickelzylinder wirken, nur ist hier

die Formveränderung in radialer Richtung anzusetzen, d. h.:

$$P_r \cdot d\delta' = dA.$$

Man führt wieder den Effektivwert des Stromes $J = \frac{i}{\sqrt{2}}$ ein und erhält

$$P_r = J^2 \frac{dL_s}{d\delta'} = J^2 \frac{Ls}{\delta'}$$

$L_s$ in voller Größe, weil im Streuspalt der ganze Streufluß wirksam ist, nach Gl. 11 eingesetzt, führt zu

$$P_r = 1{,}26\, J^2 \frac{l_u}{l_s} w^2 \cdot 10^{-8}\ [Ws/cm] \text{ oder}$$

$$P_r = 12{,}85\, (J \cdot w)^2 \frac{l_u}{l_s} \cdot 10^{-8}\ [kp]$$

$$P_r = 12{,}85\, (AW)^2 \frac{l_u}{l_s} \cdot 10^{-8}\ [kp]. \qquad \text{(Gl. 15)}$$

($AW$ aus Effektivwert des Stromes berechnen!)

$l_u$ und $l_s$ sind in gleicher Maßeinheit einzusetzen.

Der spezifische Druck auf die Wandung des Wickelzylinders mit dem Umfang $l_u$ ist also

$$p = 12{,}85 \left(\frac{AW}{l_s}\right)^2 \cdot 10^{-8}\ [kp/cm^2]. \qquad \text{(Gl. 15a)}$$

Der Druck wird vom Wickelkupfer aufgenommen, das im äußeren Zylinder auf Zug beansprucht wird. Die auftretenden Zugkräfte lassen sich leicht ermitteln. Man denkt sich die Wicklung axial durchschnitten, so daß zwei Halbzylinder entstehen (Abb. 9). Die senkrecht zur Schnittebene laufenden Komponenten der Kräfte treten in ihrer Summenwirkung in den Schnittflächen auf. Es wird also $p \cdot D \cdot l = 2P_z$ ($D$ = Spulendurchmesser, $l \sim l_s \sim$ Länge der Spule)

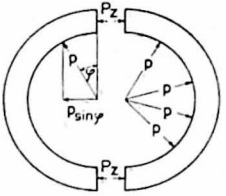



Abb. 9. Zugkräfte in Zylinderwicklung.

$$p = \frac{P_r}{l_u \cdot l} = \frac{P_r}{\pi D \cdot l}$$

$$P_z = \frac{P_r \cdot D \cdot l}{2\pi Dl} = \frac{P_r}{2 \cdot \pi}\ [kp.]$$

Die Zugbeanspruchung einer Windung ist demnach im Mittel:

$$P'_z = \frac{P_r}{2\pi \cdot w} \text{ [kp]} . \qquad \text{(Gl. 15b)}$$

Auch der Wert für $P_r$ und damit $p$, $P_z$ und $P'_z$ kann bei Auftreten eines Gleichstromgliedes im Kurzschlußfall um den 3,25fachen Betrag wachsen, was zu beachten ist, wenn für $AW = J_k \cdot w$ der Effektivwert des Kurzschlußstromes eingesetzt wird.

Bis jetzt haben wir die Wicklung als kompakte Masse angesehen, in Wirklichkeit ist sie ein in sich elastischer Körper, weil sich die einzelnen Windungen infolge der Elastizität von Leiter- und Isolationsmaterial verschieben können. Da die auf den Einzelleiter ausgeübte Kraft proportional der Stromstärke und der Induktion ist, treten (vgl. Induktionsverteilung über die Spulenbreite, Abb. 7) die größten Kräfte in den dem Streuspalt benachbarten Windungen auf, während die Stromkräfte in den äußeren Lagen des äußeren und den inneren Lagen des inneren Zylinders an sich klein sind. Wegen der Bewegungsmöglichkeit der Leiter müssen jedoch diese Windungen u. U. die Kräfte der darunter- bzw. darüberliegenden Windungen mit abfangen, weshalb die äußeren Windungen der äußeren Wicklung der Gefahr des Zerreißens ausgesetzt sind, die inneren Windungen der inneren Wicklung infolge der Pressung zusammenbrechen können. Die oben untersuchte Axial-Pressung versteift glücklicherweise die Wicklung in sich, so daß die extremen Beanspruchungen der besonders gefährdeten Windungen in Wirklichkeit nicht auftreten werden.

Sind die Zylinder von Primär- und Sekundärwicklung verschieden lang, was bei Transformatoren zur Spannungsregelung durch Zu- und Abschalten von Windungen vor allem anzutreffen ist, so treten Kräfte auf, die bestrebt sind, die Unsymmetrie zu vergrößern, die Wicklungen also axial auseinanderzuschieben.

Diese Kräfte $P_a$ sind, wie sich nachweisen läßt, der Radialkraft $P_r$ (Gl. 15), dem Verhältnis Höhendifferenz der Wicklungszylinder zu deren Gesamthöhe sowie einem Faktor $k$ proportional (vgl. Abb. 10):

$$P_a = k \cdot P_r \frac{l_2}{l} . \qquad \text{(Gl. 16)}$$

$k$ ist abhängig von den geometrischen Daten der Wicklung. Setzt man $k = 3$, so erhält man für $P_a$ Werte, die, wie Versuche gezeigt haben, der Wirklichkeit entsprechen.

$$P_a \sim 3\, P_r \frac{l_2}{l}. \qquad \text{(Gl. 16a)}$$

Die Kräfte $P_a$ müssen von den Spannkonstruktionen der Wicklungen aufgenommen werden. Bei größeren Unsymmetrien, wie sie z. B. bei Windungsschlüssen auftreten, ergeben sich dabei Kräfte, die von den oberen und unteren Auflageflächen nicht mehr aufgenommen werden können, so daß es zur Zerstörung der Wicklung kommt. Das ist der Grund, weshalb bei Stelltransformatoren, bei denen in einer Wicklung Windungen zu- und abgeschaltet werden, die Wicklungshöhe also veränderlich ist, besondere Anordnungen der Schaltwindungen gewählt werden müssen, bei denen die Unsymmetrie klein bleibt oder überhaupt verschwindet.

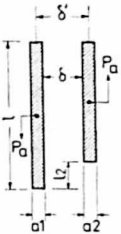


Abb. 10. Axialschub bei Zylinderwicklungen ungleicher Höhe.

### 6. Kupferverluste

Die Kupferverluste zerfallen wie die Eisenverluste in zwei wesensverschiedene Teile, die eigentlichen Leitungsverluste und die Zusatzverluste, die durch Wirbelstrombildung entstehen. Erstere sind die Ohmschen Verluste, die ein Gleichstrom von der Größe des Effektivwertes des Wechselstromes hervorrufen würde, letztere sind abhängig von der Gestalt der Spulen und Leiter sowie von der Frequenz. Von technischem Interesse ist nur die Summe der Kupferverluste, die man messen kann, indem man Primär- oder Sekundärwicklung des Transformators kurzschließt und von einer regelbaren Spannungsquelle den Nennstrom $J$ in die offenen Klemmen des Transformators schickt. Aus der aufgenommenen Wirkleistung des Transformators $p_{Cu}$ läßt sich aus der Beziehung

$$p_{Cu} = J^2 \cdot R$$

ein Widerstand $R$ berechnen, der den äquivalenten Ohmschen Widerstand des Transformators darstellt und sowohl die Teil-

widerstände beider Wicklungen enthält als auch außer dem Gleichstromwiderstand eine Komponente für die Zusatzverluste. $R$ ist immer größer als der Gleichstromwiderstand. $R$ ist als Zahlenwert jeweils auf die Nennspannung des Transformators bezogen, zu der $J$ als Nennstrom gehört. Hat man $R$ z. B. für die Oberspannungswicklung ermittelt, so ist der äquivalente Widerstand, bezogen auf die Unterspannungsseite $R'$,

$$R' = R \left(\frac{1}{\ddot{u}}\right)^2,$$

wobei $\ddot{u}$ das Übersetzungsverhältnis ist.

Setzt man die Kupferverluste ins Verhältnis zur Leistung des Transformators $N$, so wird

$$\frac{p_{Cu}}{N} = \frac{J^2 \cdot R}{J \cdot U},$$

oder, da $J \cdot R$ der Ohmsche Spannungsfall $U_r$ ist,

$$\frac{p_{Cu}}{N} = \frac{U_r}{U},$$

d. h. die prozentualen Kupferverluste sind gleich dem prozentualen Ohmschen Spannungsabfall.

Hat man rechnerisch die Gleichstromwiderstände $r_1$ und $r_2$ in Ohm für jede Wicklung ermittelt und desgleichen die Widerstandswerte für die Zusatzverluste $r_{z_1}$ und $r_{z_2}$, so ist der Gesamtwiderstand

$$R = r_1 + r_{z_1} + (r_2 + r_{z_2}) \cdot \ddot{u}^2 \quad \text{oder}$$

$$R' = (r_1 + r_{z_1}) \left(\frac{1}{\ddot{u}}\right)^2 + r_2 + r_{z_2}.$$

Den Gleichstromwiderstand kann man aus den geometrischen Daten des Wickelkupfers (Länge $l$ in m und Querschnitt $q$ in mm²) sowie der spezifischen Leitfähigkeit $\lambda$ errechnen

$$r = \frac{l}{q \cdot \lambda} \cdot [\Omega]$$

Für $\lambda$ setzt man den Wert 47 ein, der sich auf Kupfer bei einer Temperatur von 75° C bezieht.

Die Gleichstromkupferverluste sind also

$$p = i_1^2 \frac{l_1}{q_1 \cdot \lambda} + i_2^2 \frac{l_2}{q_2 \cdot \lambda}.$$

Führt man die Stromdichte $j = \frac{i}{q}$ ein und nimmt in beiden Wicklungen gleiche Stromdichte an, so wird

$$p = \frac{j^2}{\lambda} (l_1 \cdot q_1 + l_2 \cdot q_2).$$

Der Klammerausdruck ist das Kupfervolumen des Transformators in cm³, wenn $l$ in m, $q$ in mm² eingesetzt wird. Durch Einführung des spez. Gewichtes $\gamma = 8{,}9$ und des gesamten Kupfergewichtes $G_{Cu}$ in kg erhält man

$$p \sim 2{,}6 \cdot G_{Cu} \cdot j^2 \,[W]. \qquad \text{(Gl. 17)}$$

($j$ in A/mm² einsetzen.)

Die Gleichstrom-Kupferverluste sind also ebenso wie die Eisenverluste dem Materialgewicht und dem Quadrat der spezifischen Beanspruchung proportional.

Im Abschnitt 4 ist dargelegt worden, daß die Streukraftlinien des belasteten Transformators nicht nur den Raum zwischen den Wicklungen, sondern auch diese selbst durchdringen. Dabei entstehen im Leiter selbst EMKe, die Kreisströme in Ebenen senkrecht zu den Kraftlinien, also auch zur Achse des Wickelzylinders, zur Folge haben. Betrachten wir irgendeine Kraftlinie in einem Leiter, so ist der von ihr erzeugte Wirbelstrom so gerichtet, daß er den Betriebsstrom des Leiters auf der dem Streuspalt zugekehrten Seite vergrößert, auf der entgegengesetzten Seite verkleinert. Dieser Wirbelstrom erreicht eine solche Größe, daß er die ihn erregende EMK gerade im Widerstand des in seiner Bahn liegenden Leitungskupfers verbraucht. Es entstehen hierbei Verluste, die zu den Gleichstrom-Kupferverlusten addiert wurden müssen. Zahlenmäßig lassen sie sich durch folgende Überlegung ermitteln:

Die Verteilung der Streulinien über die Wicklungsbreite und damit auch über die Breite eines jeden Leiters ist bekannt, vgl. Abschn. 4. Damit ist auch die Zusatz-EMK und der von

ihr erzeugte Wirbelstrom für jeden Leiter zu ermitteln. Setzt man ihn mit dem Betriebsstrom zusammen und summiert die Verluste erst über die Leiterbreite und dann noch über die radial übereinanderliegenden Leiter, so erhält man die totalen Verluste im Wickelkupfer. Als rechnerisches Ergebnis dieser Überlegung läßt sich eine Zahl $K$ angeben, die besagt, um wieviel die Gesamtverluste größer werden als die mit Gleichstrom gemessenen oder nach Gl. 17 errechneten Verluste. Für rechteckigen und runden Drahtquerschnitt ergeben sich nach Richter folgende Werte:

$$K_{\square} = 1 + \frac{m^2 - 0{,}2}{9} \cdot \xi^4 \text{ (für Profildraht)}, \qquad \text{(Gl. 18)}$$

$$K_{\bigcirc} = 1 + \frac{m^2 - 0{,}2}{15{,}25} \cdot \xi^4 \text{ (für Runddraht)}, \qquad \text{(Gl. 18a)}$$

$$\xi = 2\pi h \cdot \sqrt{\frac{n \cdot b \cdot f}{l_s \cdot \varrho \cdot 10^5}}.$$

Hierin bedeuten:

$h$ = radiale Breite eines Leiters in cm,

$n$ = Zahl der axial übereinanderliegenden Leiter,

$b$ = axiale Höhe eines Leiters in mm,

$f$ = Frequenz,

$l_s$ = Länge der Streulinien in mm, etwa $L + 2H$,

$\varrho$ = spezifischer Widerstand des Leiters in Ohm mm²/m,

$m$ = Zahl der radial aufeinanderliegenden Leiter (vgl. Abb. 11).

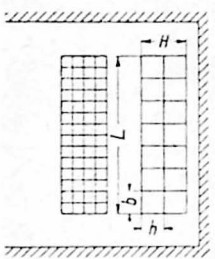



Abb. 11. Ermittlung der Zusatzverluste bei Zylinderwicklung:
Oberspannungswicklung $m = 4$, $n = 14$
Unterspannungswicklung $m = 2$, $n = 7$

In direktem Zusammenhang mit den Kupferverlusten stehen schließlich noch diejenigen Wirbelstrom- und Hysteresisverluste, die das Streufeld in Konstruktionsteilen und der Kesselwand hervorruft, denn diese Verluste sind ebenso wie die Kupferverluste eine Funktion der

Strombelastung des Transformators. Sorgt man dafür, daß auf dem Weg der Streulinien vom oberen zum unteren Rand der Wicklung keine durchgehenden massiven Eisenteile vorhanden sind, so braucht man überhaupt nur noch mit den Zusatzverlusten in der Kesselhaut zu rechnen.

Bei kleinen und mittelgroßen Transformatoren sind die Kesselverluste noch nicht von Bedeutung, bei Transformatoren mit Leistungen über 50 MVA lohnt es sich dagegen, dem Streufluß verlustarme Wege parallel zum Kesselblech anzubieten.

Dies gilt für den Transformator mit symmetrisch aufgebauter Wicklung und ausgeglichener Last. Zwingt man einen Transformator zu anomaler Streuung, etwa durch Nullpunktbelastung von Stern-Stern geschalteten Drehstromtransformatoren, so können durch den Streufluß im Kessel solche Verluste erzeugt werden, daß beträchtliche örtliche Erwärmung, ja sogar Ausglühen des Kesselblechs, auftritt.

### 7. Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad ist das Verhältnis von abgegebener Wirklast $N_{w_2}$ zu zugeführter Wirklast $N_{w_1}$. Da sich $N_{w_1}$ und $N_{w_2}$ durch die Eisen- und Kupferverluste unterscheiden, kann man schreiben

$$\eta = \frac{N_{w_1} - p_{fe} - p_{Cu}}{N_{w_1}} \qquad \text{(Gl. 19)}$$

$$\eta\% = 100 - 100\,\frac{p_{fe} + p_{Cu}}{N_{w_1}}. \qquad \text{(Gl. 19a)}$$

Sind statt der Wirkleistung Strom, Spannung und Phasenwinkel bekannt, so errechnet sich der Wirkungsgrad für Einphasentransformatoren aus:

$$\eta = \frac{U_1 J_1 \cdot \cos\varphi_1 - p_{fe} - p_{Cu}}{U_1 J_1 \cos\varphi_1}, \qquad \text{(Gl. 19b)}$$

für Drehstromtransformatoren aus:

$$\eta = \frac{U_1 J_1 \cdot \sqrt{3}\cos\varphi_1 - p_{fe} - p_{Cu}}{U_1 J_1 \cdot \sqrt{3}\cos\varphi_1}. \qquad \text{(Gl. 19c)}$$

Da sich die Kupferverluste quadratisch mit dem Strom ändern, kann man setzen

$$p_{Cu} = p_{Cu_n} \cdot \left(\frac{J}{J_n}\right)^2,$$

wobei $p_{Cu_n}$ die Kupferverluste bei Vollast sind, $J_n$ der zugehörige Nennstrom. Der Wirkungsgrad eines Transformators ist also wie der jeder Maschine lastabhängig. Er erreicht sein Maximum bei der Belastung, bei der die Kupferverluste so groß sind wie die Eisenverluste. Der Beweis ist einfach. Man setzt für $p_{Cu}$ den angegebenen Wert in Gl. 19a oder Gl. 19b ein, differenziert nach $J$ und setzt nach der Theorie der Maxima und Minima den Differentialquotienten gleich Null. Man erhält die Gleichung:

$$p_{fe} = p_{Cu_n} \cdot \left(\frac{J}{J_n}\right)^2.$$

Da die rechte Seite der Gleichung die Kupferverluste beim Strom $J$ darstellt, kann man folgern, daß der beste Wirkungsgrad bei dem Strom erreicht wird, bei dem die Kupferverluste den Eisenverlusten gleich werden. Formt man um, so wird

$$J = J_n \cdot \sqrt{\frac{p_{fe}}{p_{Cu_n}}} \qquad \text{(Gl. 20)}$$

der Belastungsstrom, bei dem der beste Wirkungsgrad auftritt. Führt man diese Beziehung in die Wirkungsgradgleichung 19a ein, so erhält man den bei gegebenen Vollastverlusten besten Wirkungsgrad zu

$$\eta_{opt}{}^0/_0 = 100 - 100\,\frac{2 \cdot \sqrt{p_{fe} \cdot p_{Cu_n}}}{N_{w_1}}. \qquad \text{(Gl. 21)}$$

Bei gleichem Vollast-Wirkungsgrad ($p_{fe} + p_{Cu_n} = \text{const}$) kann man also durch unterschiedliche Verteilung der Gesamtverluste auf Eisen und Kupfer den besten Wirkungsgrad variieren und auf verschiedene Lastpunkte verlegen, damit also der Betriebsart des Transformators Rechnung tragen.

Je mehr sich $p_{fe}$ und $p_{Cu_n}$ voneinander unterscheiden, desto größer wird $\eta_{opt}{}^0/_0$. Macht man $p_{fe} = p_{Cu_n}$, so wird $\eta_{opt}$ am

kleinsten und liegt bei Vollast. Je größer $p_{Cu_n}$ im Verhältnis zu $p_{fe}$ wird, desto größer wird $\eta_{opt}$, desto weiter rückt $\eta_{opt}$ aber auch in den Bereich kleiner Belastungen. Je höher ein Transformator durchschnittlich belastet ist, desto kleiner sollte der Unterschied zwischen Eisen- und Kupferverlusten

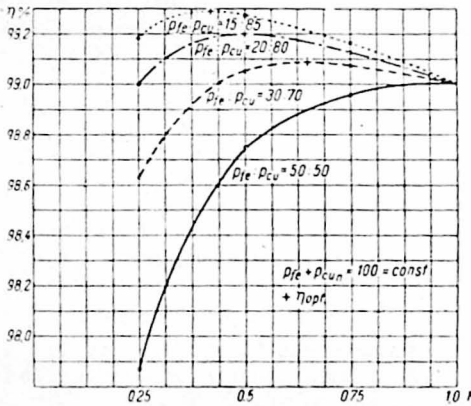



Abb. 12. Wirkungsgradkurve für verschiedene Verlust-Aufteilung. (Summen-Verluste für Nennleistung konstant.)

sein; arbeitet er im Jahresdurchschnitt dagegen z. B. nur mit Halblast, so macht man $p_{fe}/p_{Cu_n} = 1/4$, um den besten Jahres-Wirkungsgrad zu erzielen. Dabei ist unter Jahres-Wirkungsgrad zu verstehen das Verhältnis der im Laufe eines Jahres dem Transformator entnommenen kWh zu den hineinfließenden kWh.

Abb. 12 zeigt bei konstanten Vollast-Verlusten für verschiedene Verlustaufteilung den Verlauf der Wirkungsgradkurven als Funktion der Wirkbelastung eines Transformators. Der verhältnismäßig flache Verlauf der Wirkungsgradkurven zwischen 1/3 Last und Vollast, innerhalb dessen sich die Wirkungsgrade nur um etwa 1% verändern, täuscht leicht über die wirtschaftliche Bedeutung der Verluste und der

Verlustaufteilung hinweg. Bei der Projektierung tut man daher gut, statt mit den Verhältniszahlen mit den Absolutwerten der Verlust-kWh zu rechnen. Dabei findet man z. B., daß jedes kW Eisenverluste im Jahr bei 7000 Betriebsstunden 7000 kWh verbraucht. Rechnet der Betrieb die kWh am Aufstellungsort des Transformators nur mit 4 Pfg., so ergibt sich ein jährlicher Aufwand von 280 DM pro Verlust-kW. Bei einem Satz von 10% für Verzinsung und Tilgung rechtfertigt sich also eine Mehrausgabe von 2800 DM bei der Anschaffung eines Transformators für jedes kW geringere Eisenverluste. Die Kupferverluste sind wegen der quadratischen Abhängigkeit von der Belastung weniger wertvoll. Man kann je nach der Betriebsart $^1/_2$ bis $^1/_4$ des Wertes der Eisenverluste einsetzen. An Hand solcher Zahlen kann der Berechner des Transformators dann entscheiden, wieweit eine Senkung der Verluste, die nur durch Mehraufwand von Material zu erzielen ist, wirtschaftlich noch vertretbar ist.

### 8. Transformatorendiagramm

In den voranstehenden Abschnitten sind die im Leerlauf und bei Vollast im Transformator vorgehenden Erscheinungen im einzelnen behandelt, so daß die zum Aufbau des Transformator-Diagramms notwendigen Grundlagen gegeben sind. Den folgenden Betrachtungen wird ein Transformator mit gleicher Windungszahl auf Primär- und Sekundärseite zugrunde gelegt, weil sich hierdurch zeichnerisch die günstigsten Verhältnisse ergeben.

Das Diagramm Abb. 13 baut sich folgendermaßen auf:

Ausgangspunkt ist der Fluß $\Phi$, der beide Wicklungen durchsetzt, der Leerlauffluß. Zu seiner Erzeugung ist ein Leerlaufstrom $J_\mu$ nötig, der die Primärwicklung durchfließt. $J_\mu$ besteht aus einer Komponente $J_{\mu_{bl}}$, die als reiner Blindstrom magnetisierend wirkt und einer Komponente $J_{\mu_r}$, welche die Magnetisierungsverluste (Abschn. 3) deckt und als Wirkstrom senkrecht auf $J_{\mu_{bl}}$ steht.

Der Fluß $\Phi$ erzeugt in beiden Wicklungen EMKe $E_1$ und $E_2$, die ihm um 90° nacheilen und bei gleicher Windungs-

zahl gleich groß sind. Die sekundäre EMK $E_2$ zeichnen wir in richtiger Phasenlage auf, die primäre EMK $E_1$ wird, um 180° gedreht, als Gegenspannung $(-E_1)$ zur Netzspannung eingezeichnet.

Der Leerlaufstrom $J_\mu$ hat in den Windungen der Primärwicklung einen Ohmschen Spannungsabfall $U_{\mu_r}$ zur Folge, der in Phase mit $J_\mu$ liegt. Er bildet weiterhin Streukraftlinien aus, die nur mit der Primärwicklung verkettet sind und in ihr eine induktive Gegenspannung $U_{\mu_s}$ erzeugen, die $J_\mu$ um 90° voreilt. Die bei Leerlauf an die Klemmen der Primärwicklung zu legende Spannung $U_0$ muß sämtliche Gegenpannungen überwinden, also gleich deren Vektorsumme sein

$$U_0 = -E_1 \mathbin{\hat{+}} U_{\mu_r} \mathbin{\hat{+}} U_{\mu_s}.$$

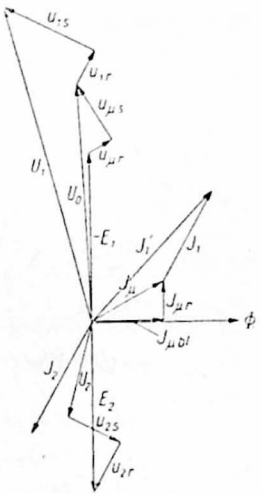



Abb. 13. Vollständiges Transformatoren-Diagramm (Leerlaufstrom und Spannungsabfälle bei Leerlauf anomal groß).

$U_{\mu_r}$ und $U_{\mu_s}$ sind im allgemeinen so klein, daß man sie gegenüber $E_1$ vernachlässigen kann, so daß bei Leerlauf das Übersetzungsverhältnis $\frac{U_0}{E_2}$ praktisch gleich dem Verhältnis der Windungszahlen

$$\frac{w_1}{w_2}\left(=\frac{E_1}{E_2}\right)$$

gesetzt werden darf.

Bei Belastung fließen in Primär- und Sekundärwicklung die Ströme $J_1$ und $J_2$, die gegenphasig sind und sich ihrer Größe nach umgekehrt verhalten wie die Windungszahlen. Da gleiche Windungszahlen vorausgesetzt sind, werden sie in gleicher Größe in das Diagramm eingetragen. Auf der Primärseite addiert sich $J_1$ noch zum Leerlaufstrom.

$J_\mu \hat{+} J_1 = J_1'$ ergibt den totalen Primärstrom. Im Vergleich zum Belastungsstrom ist im Diagramm der Leerlaufstrom aus zeichnerischen Gründen übertrieben groß gezeichnet; er beträgt in Wirklichkeit nur wenige Prozent des Vollaststromes.

Der Strom $J_1$ hat am Widerstand der Primärwicklung einen Ohmschen Spannungsfall $U_{1_r}$ und durch Ausbildung von Streukraftlinien einen induktiven Spannungsfall $U_{1_g}$ zur Folge. Ersterer liegt in Phase mit $J_1$, letzterer eilt $J_1$ um $90^0$ vor. Beide addieren sich zu den Spannungsfällen des Leerlaufstromes. Die Summe aller Spannungsfälle ergibt die bei Belastung an die Primärklemmen zu legende Spannung $U_1$.

$J_2$ hat an der Sekundärwicklung die entsprechenden Wirk- und Blindspannungsabfälle $U_{2_r}$ und $U_{2_s}$ zur Folge. Subtrahiert man sie von $E_2$, so ergibt die Summe der drei Vektoren die bei Belastung an den Sekundärklemmen auftretende Spannung $U_2$.

Durch die Spannungsfälle des Belastungsstromes hat sich das Leerlaufübersetzungsverhältnis $\frac{U_0}{E_2} \approx \frac{E_1}{E_2}$ geändert in $\frac{U_1}{U_2}$, es ist also größer geworden, oder anders ausgedrückt, bei festgehaltener Primärspannung sinkt infolge der Belastung die sekundäre Klemmenspannung.

Wie schon oben erwähnt, ist der Leerlaufstrom klein gegenüber dem Laststrom und auch die von $J_\mu$ herrührenden Spannungsabfälle klein gegenüber den von $J_1$ erzeugten. Man begeht einen für die meisten Transformatoren vertretbaren Fehler, wenn man in dem Diagramm $J_\mu, U_{\mu_r}$ und $U_{\mu_s}$ fortläßt. $J_1$ und $J_1'$ fallen dann zusammen, und somit bekommen $J_1$ und $J_2$ die gleiche Richtung. Mithin werden $U_{1_r}$ mit $U_{2_r}$ sowie $U_{1_s}$ mit $U_{2_s}$ phasengleich, und man kann die Ohmschen Spannungsfälle $U_{1_r}$ und $U_{2_r}$ sowie die induktiven $U_{1_s}$ und $U_{2_s}$ zusammenfassen zu $U_r$ und $U_s$. Man erhält damit

das vereinfachte Diagramm der Abb. 14, das in einfachster Weise den Zusammenhang zwischen Primär- und Sekundärspannung des belasteten Transformators darstellt. Das aus $U_k, U_s$ und $U_r$ gebildete rechtwinklige Dreieck heißt Kappsches Dreieck.

Die Spannungsfälle $U_r$ und $U_s$, bezogen auf die Primärseite, errechnen sich aus den Ohmschen und induktiven Widerständen $r_1$ und $r_2$ bzw. $x_{s_1}$ und $x_{s_2}$ von Primär- und Sekundärwicklung aus den Gleichungen:

$$U_r = J_1 \left( r_1 + r_2 \cdot \left( \frac{w_1}{w_2} \right)^2 \right)$$

$$U_s = J_1 \left( x_{s_1} + x_{s_2} \cdot \left( \frac{w_1}{w_2} \right)^2 \right),$$

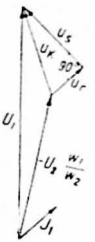


Abb. 14. Vereinfachtes Transformatoren-Diagramm.

d. h. man muß die Widerstandswerte der Sekundärseite durch Multiplikation mit dem Quadrat des Übersetzungsverhältnisses auf äquivalente Werte für die Primärseite umrechnen. Bezieht man alle Spannungsfälle auf die Sekundärseite, so errechnet man sie aus

$$U'_r = J_2 \left( r_1 \left( \frac{w_2}{w_1} \right)^2 + r_2 \right)$$

$$U'_s = J_2 \left( x_{s_1} \cdot \left( \frac{w_2}{w_1} \right)^2 + x_{s_2} \right).$$

Die geometrische Summe von $U_r$ und $U_s$ wird als Kurzschlußspannung $U_k$ bezeichnet, und zwar aus folgendem Grund: Schließt man den Transformator sekundärseitig kurz ($U_2 = 0$) und erregt ihn so, daß primärseitig der Nennstrom in den Transformator eintritt, so muß die Spannung $U_k$ an die Primärklemmen gelegt werden (vgl. Abb. 14 für $U_2 = 0$). Es ist üblich, die Kurzschlußspannung eines Transformators statt in Volt, in Prozent der Nennspannung anzugeben, was den Vorteil hat, daß der Prozentwert für Primär- und Sekundärseite in gleicher Weise gültig ist.

Bedeutung hat die Kurzschlußspannung für die Ermittlung des Dauer-Kurzschlußstromes, der bei Klemmenkurz-

schluß den Transformator durchfließen kann. Ist die prozentuale Kurzschlußspannung $u_k = 100 \frac{U_k}{U_1}$ [%] bekannt, so ist der Kurzschlußstrom $J_k$, der bei vollerhaltener Primärspannung auftreten kann:

$$J_k = J_n \cdot \frac{100}{u_k},$$

wenn $J_n$ der Nennstrom des Transformators ist.

Die Kurzschlußspannung liegt bei Transformatoren kleiner und mittlerer Leistung und Spannung, also bis 5000 kVA und 50 kV, zwischen 3% und 8%. Großtransformatoren haben Kurzschlußspannungen zwischen 8% und 12%. Bei kleinen und mittleren Transformatoren können also Kurzschlußströme auftreten, die das 12,5—33,3 fache des Normalstromes betragen, bei Großtransformatoren braucht man nur mit dem 8,5—12,5 fachen Strom zu rechnen, was für die Abschaltleistung der Schalter und die Bemessung der Kurzschlußfestigkeit von Stromwandlern und anderen Hochspannungsapparaten bedeutungsvoll ist.

### 9. Spannungsänderung

So erwünscht eine große Kurzschlußspannung mit Rücksicht auf ihre den Kurzschlußstrom dämpfende Wirkung ist, so unerwünscht ist sie infolge ihrer Rückwirkung auf die Spannungshaltung. Je größer $U_k$ ist (vgl. Abb. 14), um so größer wird der Unterschied zwischen primärer und auf die Primärseite bezogener sekundärer Klemmenspannung, die Spannungsänderung.

Da die Spannungsänderung eine betrieblich wichtige Größe ist, soll sie im folgenden auch rechnerisch untersucht werden. Sie wird definiert als arithmetische Differenz zwischen sekundärer Leerlaufspannung und sekundärer Klemmenspannung bei Belastung, konstante Primärspannung vorausgesetzt.

In Abb. 15 ist der Kopf des Diagrammes von Abb. 14 nochmals vergrößert dargestellt. Größe und Lage des rechtwinkligen Dreiecks mit den Katheten $U_r$ und $U_s$ und der Hypotenuse $U_k$, des sogenannten Kappschen Dreiecks, nach Gisbert Kapp, der es erstmalig zur Verwendung empfahl,

bestimmen offenbar die Größe der Spannungsänderung $\Delta U$. Bei Leerlauf schrumpft es zu einem Punkt zusammen, d. h. die auf die Primärseite bezogene sekundäre Leerlaufspannung $U_2 \frac{w_1}{w_2}$ wird gleich $U_1$.

Wenn das Kappsche Dreieck steil nach oben gerichtet ist, der Winkel zwischen $U_1$ und $U_2 \cdot \frac{w_1}{w_2}$ klein ist, kann man mit guter Annäherung schreiben: $\Delta U \sim U_r \cos\varphi \pm U_s \cdot \sin\varphi$.

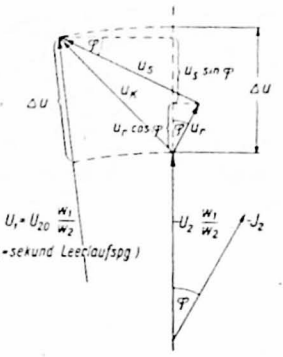



Abb. 15. Ermittlung der Spannungsänderung bei Belastung.

Das Minuszeichen gilt bei voreilendem Strom.

$\varphi$ ist der Winkel der Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung auf der Sekundärseite. Die so errechneten Werte sind etwas zu klein. Nach VDE wird die prozentuale Spannungsänderung $u_\varphi = \Delta U\%$ ermittelt nach der Gleichung: $u_\varphi$, $u_r$, $u_s$ und $u_k$ sind jeweils die in % ausgedrückten Werte der entsprechenden Spannungen.

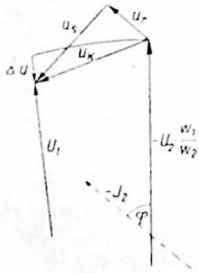



Abb. 16. Spannungsänderung bei voreilendem Strom.

$$u_\varphi = 100 - \sqrt{100^2 - u_\varphi'^2} + u_\varphi'' \quad \text{(Gl. 22)}$$

$$u_\varphi' = u_r \cos\varphi + u_s \sin\varphi \quad \text{(Gl. 22a)}$$

$$u_\varphi'' = u_r \cdot \sin\varphi - u_s \cdot \cos\varphi. \quad \text{(Gl. 22b)}$$

Meist ist nur $u_k$ gegeben und die Kupferverluste $p_{Cu}$. Dann muß man zunächst $u_r$ errechnen nach $u_r = \frac{p_{Cu}}{N} \cdot 100$. $u_s$ errechnet man dann aus

$$u_s = \sqrt{u_k^2 - u_r^2}.$$

Beispiel: Ein 5000 kVA-Transformator 30/10 kV hat 6% Kurzschlußspannung und 40 kW Kupferverluste. Auf der 10 kV-Seite wird ihm der Nennstrom bei $\cos\varphi = 0{,}7$ entnommen.

$$u_r = \frac{40}{5000} \cdot 100 = 0{,}8\%;\ u_k = 6\%$$

$$u_s = \sqrt{36 - 0{,}64} = 5{,}95\%;\ u'_\varphi = 0{,}56 + 4{,}16 = 4{,}72$$

$$u''_\varphi = 0{,}56 - 4{,}16 = -3{,}6$$

$$u_\varphi = 100 - \sqrt{100^2 - 13} + 4{,}72 = 4{,}78\%.$$

Für $u_r > u_s$ ergeben Ströme mit kleiner Phasenverschiebung, für $u_r < u_s$ Ströme mit großer Phasenverschiebung starke Spannungsänderungen. Voreilende Ströme führen, wie Abb. 16 zeigt, sogar zu Spannungserhöhungen. Die größte Spannungsänderung tritt ein, wenn der nacheilende Laststrom mit der Sekundärspannung den Kurzschlußwinkel des Transformators einschließt, weil dann die Hypotenuse des Kappschen Dreiecks in Phase liegt mit der Sekundärspannung, also in voller Höhe die Spannung verändert.

Zum Ausgleich des inneren Spannungsfalles und natürlich auch zur willkürlichen Veränderung der Klemmenspannung eines Transformators bestehen grundsätzlich zwei Möglichkeiten. Man kann die Windungszahl einer Wicklung verändern oder man muß den Nutzfluß so steuern, daß er die eine Wicklung nur teilweise durchsetzt (Induktionsregler); in beiden Fällen ändert man das Übersetzungsverhältnis des Transformators. Praktisch wird, abgesehen von Niederspannungsstelltransformatoren, nur von der ersten Möglichkeit Gebrauch gemacht (vgl. Abschnitt 12).

## II. Gestaltung der Transformatoren

### 10. Haupttypen der Transformatoren

Es gibt die verschiedensten Möglichkeiten, Transformatoren zu gruppieren, je nachdem man Betriebsart, Schaltung, Ausbildung des Kernes oder der Wicklung, äußere Beschaffenheit oder Verwendungsgebiet als Gesichtspunkt für die Unterteilung wählt. Das bedeutungsvollste Unterscheidungsmerkmal ist die Stromart, für die der Transformator verwendet wird, wobei besonders zwei Stromarten praktisches Interesse haben, Einphasen-Wechselstrom und Drehstrom.

Der Einphasen-Transformator ist das Urbild des Transformators überhaupt. Er wird im allgemeinen mit zwei bewickelten Schenkeln ausgeführt (Abb. 17) und dann als Kerntype bezeichnet. Bewickelt man nur einen Schenkel und ordnet links und rechts symmetrische unbewickelte Rückschlußschenkel an (Abb. 18), so

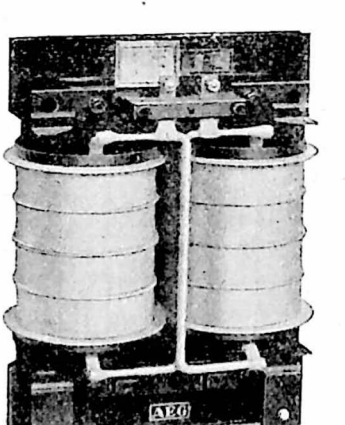



Abb. 17.
Einphasen-Trocken-Transformator, Kerntype.
(Fabrikat AEG.)

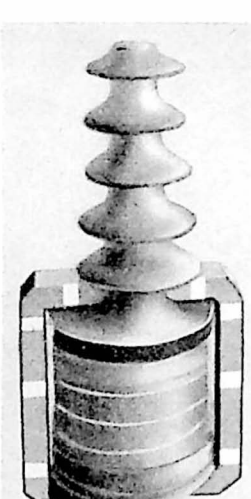


Abb. 18. Einphasen-Transformator, Manteltype.
(Spannungswandler, Fabrikat K. u. St.)

erhält man die Manteltype. In Amerika werden kleine Einphasen-Transformatoren häufig auch mit aus Band gewickelten Kernen (Abb. 19) ausgeführt. Das Anwendungsgebiet der Einphasen-Transformatoren liegt für mittlere und größere Leistungen in Deutschland im elektrischen Vollbahnbetrieb, der Einphasen-Wechselstrom mit $16^2/_3$ Hz verwendet, und in Industriebetrieben zur Speisung einphasiger

Elektroöfen. Wenn bei Höchstleistungen (etwa ab 300 MVA) Drehstromtransformatoren nicht mehr bahntransportfähig hergestellt werden können, zerlegt man das Drehstromaggregat in drei Einphasentransformatoren. Die Kerntype wird weitaus häufiger gebaut als die Manteltype, die fast nur noch als Lokomotiv-Transformator (Abb. 20) anzutreffen ist. Im übrigen tritt der Einphasentransformator zurück vor dem

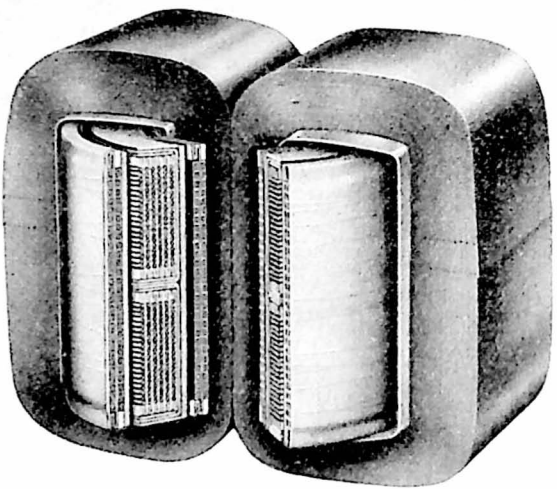


Abb. 19. Einphasen-Transformator mit Bandkern (Bauart General Electric).

Drehstrom-Transformator, der das Feld völlig beherrscht. In seiner ursprünglichen Form besteht der Drehstrom-Transformator aus drei Einphasen-Transformatoren, die in Stern- oder Dreieck-Schaltung zwischen die 3 Leiter des Drehstrom-Netzes geschaltet werden (Abb. 21).

In vielen Ländern werden, wie schon erwähnt, Großtransformatoren mit Rücksicht auf die Transportmöglichkeiten und die Reservehaltung (1 Pol als Reserve) in dieser Form als sogenannte Transformatorbank ausgeführt. Der begreifliche Wunsch, die 3 Einphasen-Transformatoren konstruktiv

zu einer Einheit zu verschmelzen, läßt sich erfreulicherweise sogar mit erheblicher Materialersparnis durchführen. Folgen wir dem Gang der Entwicklung: Bringt man bei den drei Einphasen-

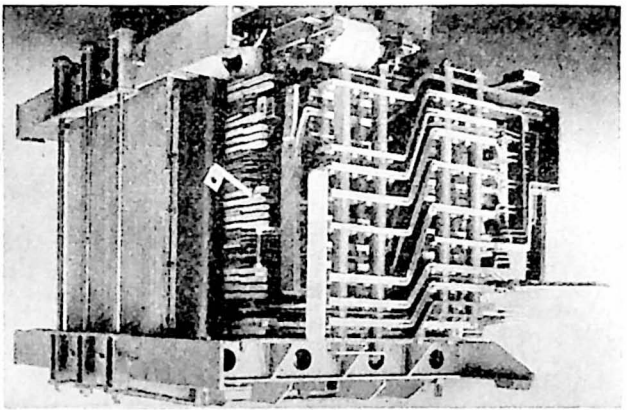


Abb. 20. Lokomotiv-Transformator.
(Mantel-Transformator mit Scheibenwicklung, Bauart SSW.)

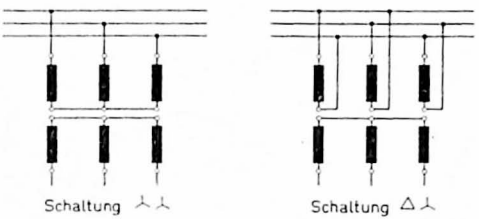



Abb. 21. Drehstrom-Transformator-Satz,
gebildet aus drei Einphasen-Transformatoren.

Transformatoren die Wicklung jeweils nur auf einem Schenkel an, so kann man die drei Kerne so zusammenstellen, daß die unbewickelten Schenkel sich berühren, die bewickelten Kernsäulen im Grundriß auf einem Kreis je 120° voneinander entfernt stehen. Der nächste Schritt ist die Vereinigung der drei

unbewickelten Schenkel zu einer einzigen Säule, die die Flüsse aller drei Phasen vom Ober- zum Unterjoch zu führen hat. Da aber im Drehstromsystem die Summe der drei Phasenspannungen in jedem Augenblick gleich Null ist und die Flüsse den Spannungen proportional sind, tritt in dem gemeinsamen Rückschlußschenkel überhaupt kein Fluß auf, so daß er fortfallen kann, ohne daß an den magnetischen Verhältnissen irgend etwas geändert wird (Abbildung 22). Der nächste Schritt war die Verlegung der drei Schenkel in eine Ebene, womit die Normalform des Kernes von Drehstrom-Transformatoren erreicht ist (Abb. 23). Da bei dieser Kernform die Flüsse der äußeren Schenkel einen längeren Weg vorfinden als der Fluß des Mittelschenkels, stellt sich eine Ungleichheit im Magnetisierungsstrom ein. Der mittlere Schenkel nimmt einen kleineren Magnetisierungsstrom auf als die Außenschenkel.

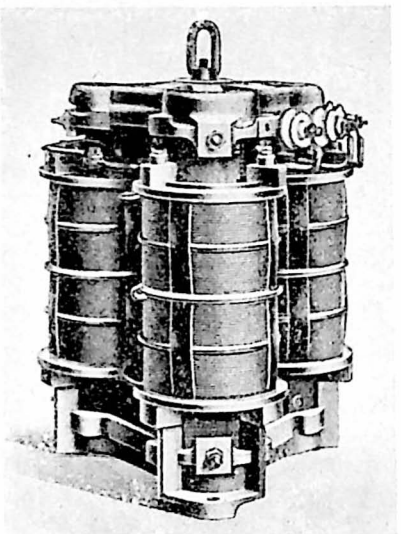


Abb. 22. Alte Bauart des Drehstrom-Transformators (Tempel-Type).

Solange der Wicklungssternpunkt mit dem Generatorsternpunkt verbunden ist, kann der Überschußstrom der beiden Außenschenkel durch den Nulleiter abfließen. Bei Transformatoren ohne Dreieckwicklung und mit isoliertem Nullpunkt dagegen muß auch noch die Summe der Ströme,

also auch der Magnetisierungsströme, in den drei Phasen zu Null werden. Zusammen mit der Bedingung ungleich großer

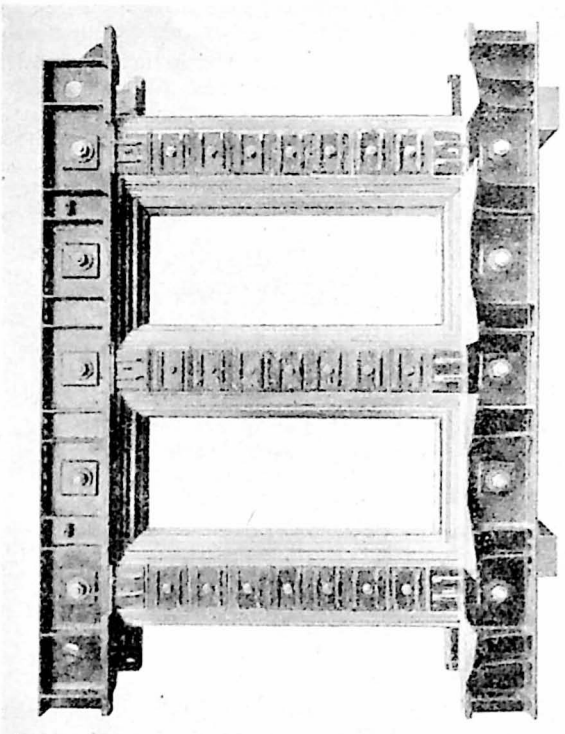


Abb. 23. Kern eines Drehstrom-Transformators. (Bauart AEG).

Magnetisierungsströme in Außen- bzw. Mittelschenkel ergibt sich eine Zwangslage, die der Transformator durch Ausbildung eines Flusses vom Ober- zum Unterjoch und damit einer Verlagerung des Nullpunktes beantworten muß (s. Abb. 24).

$J_{\mu_I}$, $J_{\mu_{II}}$ und $J_{\mu_{III}}$ sind die zur Magnetisierung des unsymmetrischen Kernes nötigen Ströme in den drei Schenkeln I, II und III. Diese ergeben summiert den Strom $J_{\mu_0}$, der keine Rückschlußmöglichkeit hat, also nicht auftreten kann. Nimmt dagegen jeder Schenkel außer den Strömen $J_{\mu_I}$ ... noch $^1/_3 J_{\mu_0}$ auf (Abb. 24b), so ergeben sich die Schenkelströme $J'_{\mu_I}$ bis $J'_{\mu_{III}}$, die nun in Summe gleich Null sind, also das

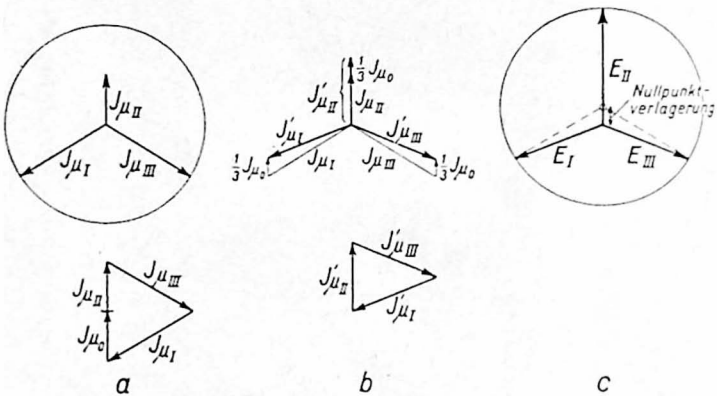



Abb. 24. Magnetisierungsströme und Spannungen im Drehstrom-Transformator mit isoliertem Nullpunkt ohne Dreieckwicklung; *a* erforderliche Magnetisierungsströme; *b* tatsächliche, dem Transformator zufließende Phasenströme; *c* Phasenspannungen und Nullpunktsverlagerung.

Kirchhoffsche Gesetz für den Sternpunkt erfüllen. Dafür überlagert sich nun dem Fluß in jeder Phase ein von $^1/_3 J_{\mu_0}$ herrührender Fluß, der in allen drei Schenkeln gleichgerichtet ist, seinen Rückschluß also vom Ober- zum Unterjoch durch Luft bzw. Öl und Kesselwand nimmt und deshalb im Vergleich zum Nutzfluß klein bleibt. Dieser Fluß erzeugt in allen drei Phasen eine gleich große, gleichphasige EMK, die sich den von $J_{\mu_I}$, $J_{\mu_{II}}$ und $J_{\mu_{III}}$ erzeugten symmetrischen Drehstrom-EMKen überlagert. Er erzeugt hierdurch eine Nullpunktsverlagerung, die als Spannung zwischen Sternpunkt

und Erde gemessen werden kann. Der mit isoliertem Sternpunkt betriebene unsymmetrische Transformator bildet also ungleich große Phasenspannungen aus (Abb. 24c), wobei aber die Differenz je zweier Phasenspannungen, d. h. die verketteten Spannungen wieder untereinander gleich groß werden und symmetrisch liegen; die Magnetisierungsströme sind ungleich groß.

Eine Dreieckwicklung symmetriert den Nullpunkt wieder durch Kurzschluß des Feldes, das von $^1/_3 J_{\mu_0}$ in den drei Schenkeln erzeugt wird. In der Dreieckwicklung fließt also ein Strom von $-^1/_3 J_{\mu_0}$, der den Fluß vom Ober- zum Unterjoch kompensiert und damit die Nullpunktsverlagerung aufhebt.

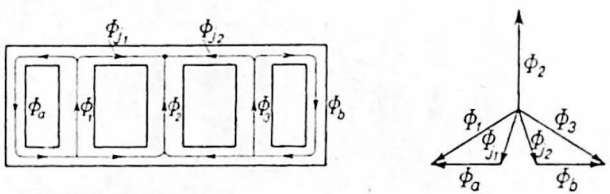



Abb. 25. Flußverteilung im Fünfschenkelkern.

Wird der Transformator überhaupt von der Dreieckwicklung erregt, so fließen in den Wicklungen der 3 Schenkel die Ströme $J_{\mu_I}$, $J_{\mu_{II}}$ und $J_{\mu_{III}}$ (Abb. 24a). Aus dem Netz dagegen treten in die Eckpunkte des Dreiecks Ströme ein, die die Differenz der anliegenden Schenkelströme sind, also $J_{\mu_I} - J_{\mu_{II}}$, $J_{\mu_{II}} - J_{\mu_{III}}$ und $J_{\mu_{III}} - J_{\mu_I}$. Diese Ströme sind zwar ebenfalls verschieden groß, ihre Summe ist aber Null.

Da die Joche den gleichen Fluß zu führen haben wie die Schenkel, müssen sie auch den gleichen Querschnitt wie diese bekommen. Bei Transformatoren größter Leistung macht es Schwierigkeiten, bei vollem Jochquerschnitt den Transformator so zu bauen, daß er noch bahnprofilgängig ist. Zur Verminderung der Bauhöhe führt man diese Transformatoren dann als Fünfschenkeltransformatoren aus. Durch die Gabelung der Flüsse (Abb. 25) verkleinert man den Joch-

fluß und spart damit an Jochhöhe. Der Fünfschenkeltransformator hat im vierten und fünften Schenkel einen freien magnetischen Rückschluß vom Oberjoch zum Unterjoch. Er ist deshalb, sofern er ohne Dreieckwicklung ausgeführt wird, ungeeignet zu Belastungen zwischen dem Nullpunkt und einer Phase, weil der einphasige Laststrom mangels Gegen-AW ein kräftiges Feld über die Rückschlußschenkel ausbilden würde, für diese Art der Belastung also eine starke Drosselwirkung auftritt. Erdschlußspulen z. B. können deshalb an

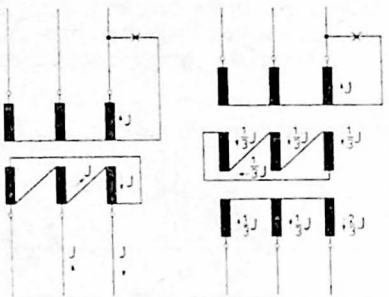


Abb. 26. Wirkung der Dreieckwicklung auf einphasige Belastungen.

Fünfschenkeltransformatoren ohne Dreieckwicklung nicht angeschlossen werden.

Abb. 26 zeigt, wie dagegen eine Dreieckwicklung, einerlei ob sie als Arbeits- oder Tertiärwicklung ausgeführt wird, immer in der Lage ist, Schenkel für Schenkel einen vollständigen AW-Ausgleich herbeizuführen, so daß der Nullpunktstrom nicht feldbildend wirken kann, eine Nullpunktbelastung also trotz der Rückschlußschenkel möglich ist.

Anwendung fand der Fünfschenkelkern gelegentlich auch bei Drehstrom-Spannungswandlern. Erdet man bei diesen die Hochvoltneutrale, so kann man bei Erdschluß einer Phase des Netzes an einer Sekundärwicklung, die hälftig auf dem 4. und 5. Schenkel liegt, die Spannung messen, die der Nullpunkt des Netzes bei Erdschluß gegen Erde annimmt.

Sieht man für jeden Schenkel eines Drehstromtransformators einen magnetischen Rückschluß vor, so erhält man den Drehstrom-Manteltransformator, der wegen seines komplizierten Aufbaues in Deutschland nicht und in anderen Ländern nur von wenigen Firmen gebaut wird.

Ein Transformatortyp, der Scott-Transformator, verdient in diesem Abschnitt der Erwähnung, da er in manchen Netzen noch verwendet wird. Die Scott-Schaltung ist die Kombination von zwei Einphasen-Transformatoren derart, daß nach Abb. 27 der eine Transformator, Höhentransformator genannt, einpolig mit der Wicklungsmitte des zweiten, des Basistransfor-

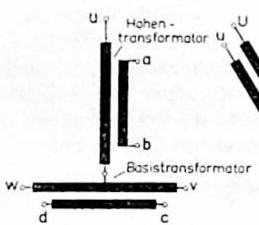



Abb. 27. Scott-Transformator.

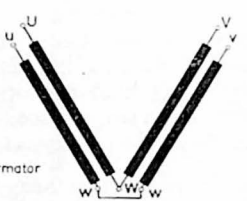



Abb. 28. V-Schaltung.

mators, verbunden wird. Hat der Basistransformator primär $w_b$ Windungen und gibt man dem Höhentransformator $w_h = \frac{1}{2}\sqrt{3} \cdot w_b$ Windungen, so kann man bei Speisung der 3 Klemmen $u$, $v$, $w$ des Aggregates mit symmetrischem Drehstrom an den 4 Sekundärklemmen $a$, $b$, $c$ und $d$ ein unverkettetes symmetrisches Zweiphasen-System abnehmen mit 2 um 90° gegeneinander verschobenen Spannungen. Natürlich kann man auch zwei getrennte Einphasen-Systeme damit speisen. Von dieser Möglichkeit hat man z. B. Gebrauch gemacht bei Lieferung von Einphasenstrom für Vollbahnbetrieb aus dem Drehstromnetz einer Landesversorgung. Sind beide Einphasen-Netze gleich belastet, so speist das Drehstromnetz symmetrischen Drehstrom. Die Belastung des Höhentransformators allein verteilt sich auf alle 3 Phasen des

Drehstromsystems, ohne allerdings dadurch den einphasigen Charakter der Belastung, z. B. in der Ankerrückwirkung der Generatoren, verändern zu können. Bringt man die zwei Transformatoren des Scott-Satzes in 2 getrennten Gefäßen unter, so ergibt sich eine bessere Reservehaltung gegenüber einem zweifach einphasig belasteten Drehstromtransformator, weil bei Ausfall eines Transformators des Scott-Satzes noch teilweise Stromlieferung durch den verbleibenden Einphasen-Transformator möglich ist, während der Drehstromtransformator bei Beschädigung ganz ausfällt.

Eine weitere Möglichkeit der Zusammenschaltung von zwei Einphasentransformatoren ist die V-Schaltung (Abb. 28), die Drehstrom-Speisung und -Abnahme gestattet. Sie kann hergeleitet werden aus dem in Dreieck erfolgten Zusammenschluß von 3 Einphasen-Transformatoren und nachträglicher Fortlassung des Transformators einer Dreieckseite. Aktives Material wird nicht gespart, weil die verbleibenden zwei Transformatoren den vollen Phasenstrom führen müssen, statt des $\frac{1}{\sqrt{3}}$ fachen Phasenstromes beim vollständigen in Dreieck geschalteten Drehstromsatz, es ist sogar ein rechnerischer Material-Mehraufwand i. V. 2/1,73 nötig. Ein weiterer Nachteil ist der unsymmetrische Spannungsabfall bei Belastung, der das Spannungsdreieck verzerrt. Die V-Schaltung wird fast nur bei Meßsätzen aus 2 Einphasenwandlern verwendet.

### 11. Spartransformatoren

Nicht in allen Fällen wird der Transformator mit Primär- und Sekundärwicklung versehen. Man kann auch eine Spannungstransformation durch Anzapfung einer Wicklung bei der gewünschten Spannung erreichen. Die zweite Wicklung läßt sich dann einsparen; der Transformator, wegen des geringeren Materialaufwandes im Vergleich zum Zweiwicklungstransformator, Spar-Transformator— im Ausland Auto-Transformator — genannt, arbeitet nun als induktiver Spannungsteiler.

Über die Stromverteilung im Spartransformator verschafft man sich leicht Aufschluß, wenn man beachtet, daß auch für den Spartransformator das eine Grundgesetz der Transformation gilt, daß nämlich Schenkel für Schenkel die AW in Summe Null ergeben müssen, wenn man den Magnetisierungsstrom außer Betracht läßt. Schließlich müssen zu- und abfließende Leistung, vom Eigenverbrauch des Transformators abgesehen, gleich sein. Nach Abb. 29 wird ein Drehstrom-Spartransformator an den Klemmen $u_1, v_1, w_1$ mit den Spannungen $U_1$, $V_1$ und $W_1$ gespeist. An den Klemmen $u_2$, $v_2$, $w_2$ werden die Spannungen $U_2$, $V_2$, $W_2$ abgenommen. Bezeichnet man die Windungen, die zwischen $u_1u_2$, $v_1v_2$ und $w_1w_2$ liegen, mit $w_1$ und die zwischen $u_2$, $v_2$, $w_2$ und dem Sternpunkt liegenden Windungen mit $w_2$, so muß sein:

$$U_1 : U_2 = (w_1 + w_2) : w_2.$$

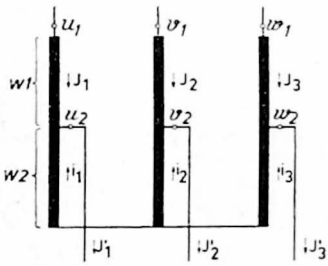


Abb. 29. Stromverteilung im Spartransformator.

Wird dem Spartransformator der Strom $J_1'$ entnommen, so muß ihm der Strom $J_1$ zufließen, der sich gemäß der Leistungsbilanz errechnet zu

$$J_1 = J_1' \frac{U_2}{U_1}.$$

$J_1$ ist also kleiner als $J_1'$, weil $U_2$ die kleinere Spannung ist Zur Bildung von $J_1'$ muß demnach zu $J_1$ noch ein Strom $i_1$ treten, der aus dem Sternpunkt kommend der Klemme $u_2$ zufließt: $J_1' = J_1 + i_1$. Wir prüfen nun noch, ob die AW sich für jeden Schenkel aufheben. Nach unten gerichtet sind: $J_1 \cdot w_1$ AW, nach oben: $i_1 \cdot w_2$ AW. Setzt man für $i_1$ $J_1' - J_1$ ein und für

$$J_1' = J_1 \frac{U_1}{U_2} = J_1 \frac{w_1 + w_2}{w_2},$$

so erhält man $i_1 \cdot w_2 = J_1 \cdot w_1$. Die angenommene Stromverteilung wird also der Leistungs- und der AW-Bilanz gerecht.

Die Ströme $i$ bilden in den 3 Schenkeln ein symmetrisches Drehstrom-System, sind also in Summe = Null, wodurch es erklärlich ist, daß der Nullpunkt des Spartransformators ohne selbst gespeist zu sein, drei Ströme ausschickt.

Wird der Spartrafo bei der kleineren Spannung gespeist, so kehren sich sämtliche Stromrichtungen um. Die Größe der Ströme bleibt unverändert. Die Ströme $i$ verschwinden im Nullpunkt.

Zur Beurteilung der Materialersparnis bei Verwendung eines Spartransformators an Stelle eines Zweiwicklungstransformators, denkt man sich den Spartransformator an der Stelle der Anzapfungen aufgeschnitten, so daß zwei Wicklungen mit $w_1$ bzw. $w_2$ Windungen entstehen. In dieser Form kann der zum Zweiwickler gewordene Spartransformator offenbar nur noch die Leistung $N_{T_r} = 3i \cdot U_2$ übertragen, ($U_2 = V_2 = W_2$ = Strangspannung), $N_{T_r}$ ist also seine Typenleistung als Zweiwickler, während er als Spartransformator die Leistung $N_D = 3J_1' \cdot U_2$ als Durchgangsleistung übertragen konnte. Die Typenleistung verhält sich also bei Spartransformatoren zur Durchgangsleistung wie

$$\frac{N_{T_r}}{N_D} = \frac{i}{J_1'} = \frac{J_1' - J_1}{J_1'} = \frac{U_1' - U_2}{U_1}. \qquad \text{(Gl. 23)}$$

Je kleiner also der Spannungsunterschied zwischen Primär- und Sekundärspannung ist, desto kleiner ist die Typenleistung im Vergleich zur Durchgangsleistung, desto günstiger wird der Spartransformator im Vergleich zum Zweiwicklungstransformator. Will man eine Leistung von 1000 kVA von 6 auf 5 kV transformieren, so genügt bei Sparschaltung ein Transformator von nur 167 kVA Typenleistung. Wollte man dagegen einen Transformator für 1000 kVA und eine Übersetzung von 10/0,4 kV als Spartransformator ausbilden, so brauchte man eine Type von 960 kVA, d. h. der Spartransformator lohnt nur bei kleinen Spannungsdifferenzen.

Mit der Verkleinerung der Typenleistung sinken auch die Verluste, so daß der Wirkungsgrad von Spartransformatoren,

wenn man ihn sinngemäß richtig auf die Durchgangsleistung bezieht, außerordentlich günstig wird. Da bei 10% Spannungsdifferenz z. B. ein Spartransformator das 10fache seiner Typenleistung übertragen kann, wird, wenn die Verluste 2%, bezogen auf die Typenleistung, betragen, der Wirkungsgrad des Spartransformators 99,8%.

Aus dem gleichen Grund ist die Kurzschlußspannung von Spartransformatoren sehr klein; sie liegt bei den gebräuchlichen Typen unter 1%. Da der Spartransformator also bei Netzkurzschlüssen wegen seiner kleinen Kurzschlußspannung den Kurzschlußstrom nur unwesentlich dämpft, müssen Spartransformatoren durch Vorschaltung von Kurzschluß-Drosselspulen immer dann geschützt werden, wenn der Kurzschlußstrom hinter dem Spartransformator mehr als das 30fache von dessen Normalstrom betragen kann, weil man sonst damit rechnen muß, daß er den dynamischen Wirkungen des Kurzschlußstromes nicht standhält. Der Zweiwicklungstransformator schützt sich im Gegensatz zum Spartransformator durch seine immer über 3% liegende Kurzschlußspannung selbst vor Strömen, die seinen 30fachen Normalstrom übersteigen würden.

Wenn trotz des beträchtlichen wirtschaftlichen Anreizes der Spartransformator — von Höchstspannungsnetzen abgesehen — fast nur in Gestalt von Regeltransformatoren gebraucht wird, so hat dies seinen Grund in der berechtigten Scheu, Netze verschiedener Spannung galvanisch miteinander zu verbinden, und zwar mit Rücksicht auf den Erdschluß. Kuppelte man z. B. ein 50- und ein 20-kV-Netz über einen Spartransformator, so würden sich bei Erdschluß im 50-kV-Netz nicht nur das Potential der gesunden Phasen des 50-kV-Netzes Phasenspannung auf verkettete Spannung gegen Erde heben, was zulässig ist, sondern es würden auch im 20-kV-Netz die entsprechenden Phasen eine Spannung von 36 kV gegen Erde annehmen (Abb. 30) und damit die Isolation des 20-kV-Netzes, die für 11,6 kV normal bzw. 20 kV gegen Erde bei Erdschluß bemessen ist, erheblich überbeansprucht werden. Das ist der Grund, weshalb der Unterschied der Spannungen bei Spartransformatoren so zu begrenzen ist, daß die Isolation der

Netze in Störungsfällen nicht überbeansprucht wird. — In Netzen, die mit starr geerdetem Nullpunkt betrieben werden,

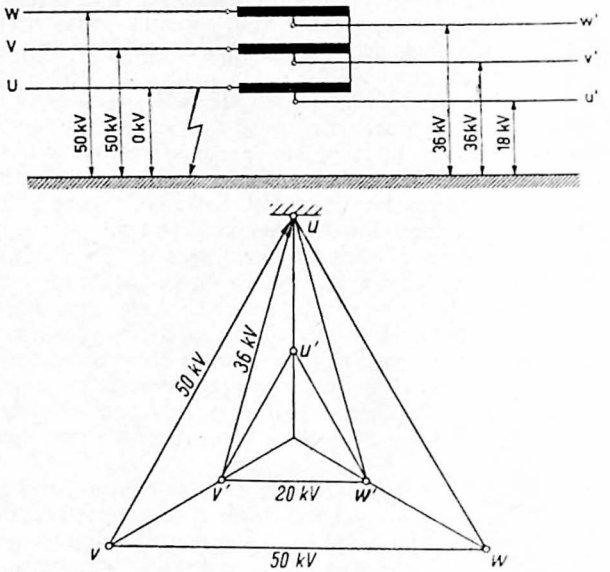



Abb. 30. Erdschluß-Übertragung durch Spartransformator.

wo also bei Erdschluß eine Spannungserhöhung der anderen Phasen nicht auftritt, werden Spartransformatoren auch bei größeren Spannungsunterschieden verwendet.

### 12. Regel-(Stell-) Transformatoren
(Transformatoren mit Stufenschalter)

Stark schwankende Belastung und der Richtungswechsel des Energieflusses in den großen Verbindungsleitungen der Hochspannungsnetze führen zu Spannungsschwankungen, die weit über das vom Abnehmer hinzunehmende Maß hinausgehen und die nicht mehr von den Generatoren ausgeregelt werden

können. Transformatoren mit unter Last veränderlichem Übersetzungsverhältnis sind deshalb notwendig geworden.

Es gibt nur zwei Möglichkeiten, das Übersetzungsverhältnis eines Transformators zu ändern: man läßt von dem in der Primärwicklung erzeugten Fluß nur einen veränderlichen Teil die Sekundärwicklung durchfließen oder man ändert die Windungszahl von Primär- oder Sekundärwicklung. Von der ersten Möglichkeit wird nur selten Gebrauch gemacht (Induktionsdrehregler, Schub- und Gleittransformatoren), so daß wir uns

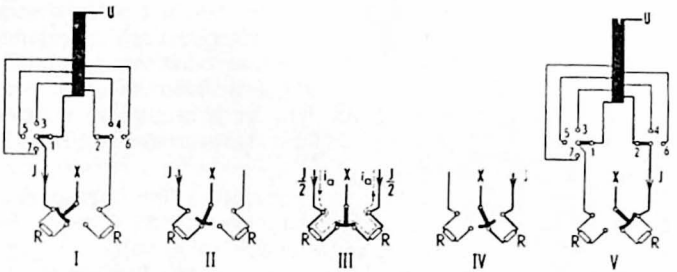



Abb. 31. Prinzipschaltbild des Jansenschalters (Überschaltung von Anzapfung 1 auf 2).

auf die Beschreibung der Transformatoren mit Stufenschalter beschränken können, die von der Änderung des Übersetzungsverhältnisses durch Zu- und Abschaltung von Windungen einer Wicklung Gebrauch machen.

Wenn man beim Wechsel der Windungszahl den Betriebsstrom nicht unterbrechen will, so ist beim Überschalten eine wenn auch nur kurzzeitige — galvanische Verbindung von zwei Anzapfungen der Wicklung unvermeidlich; dies bedeutet aber einen Kurzschluß von einer oder mehreren Windungen, was unzulässig ist. Um den Kurzschluß zu verhüten, muß man, bevor die Anzapfungen gewechselt werden, zwischen zwei Anzapfungen eine Impedanz schalten, die den von der Stufenspannung im Kreis getriebenen Strom auf ein für die Wicklung ungefährliches Maß begrenzt. Nun kann man (Abb. 31) die

Verbindung zwischen der ersten Anzapfung lösen, wobei der Laststrom auf die zweite Anzapfung übergeht. Da er hierbei einen Spannungsfall an der eingeschalteten Impedanz erleidet, muß deren Größe als Kompromiß zwischen dem Wunsch nach kleinem Kreisstrom und kleinem Spannungsfall gesucht werden. Durch Kurzschließen der Überschaltimpedanz ist schließlich die Umschaltung endgültig vollzogen.

Als Überschaltimpedanz kann man Drosseln oder Ohmsche Widerstände verwenden. Drosseln haben den Vorteil, daß sie mit erträglichem Aufwand für dauernde Belastung durch den Betriebsstrom zu bauen sind, Ohmsche Widerstände gestalten die Abschaltung des Kreisstromes sanfter und schonen damit die Überschaltkontakte. In Deutschland hat man sich mit bestem Erfolg schon vor mehr als zwei Jahrzehnten für den Ohmschen Widerstand entschieden, der jetzt auch in anderen Ländern in zunehmendem Maße für Transformatoren-Stufenschalter verwendet wird.

Das von B. Jansen angegebene Prinzip der Transformatoren-Stufenschalter, wie sie in Deutschland ausschließlich verwendet werden, beruht auf folgenden Grundgedanken: Die Umschaltung zerfällt in zwei getrennte Vorgänge, die Stufenvorwahl und die eigentliche Lastumschaltung. Die Stufenvorwahl geschieht stromlos, der Wähler kann daher im Öl des Transformators in der Nähe der mit Anzapfungen versehenen Wicklung untergebracht werden; an den Wählerkontakten entstehen keine Funken, die das Transformatorenöl zersetzen würden. Das Schalten von der in Betrieb befindlichen Anzapfung auf die nächste, vorgewählte, geschieht über Ohmsche Widerstände, die für nur kurzzeitige Strombelastung bemessen werden. Die Überschaltung erfolgt rasch und mittels Kraftspeicher, damit auch bei Störungen im Motorantrieb der Umschalter nicht in einer Zwischenstellung stehen bleiben kann, was zur Überlastung der Widerstände führen könnte.

Wegen leichter Zugänglichkeit bei Kontrollen und Auswechslung der Kontakte sowie Verminderung der Gefahr im Falle eines Defektes im Lastumschalter wird dieser vorteilhafterweise außerhalb des Transformatorkessels in einem getrennten Ölgefäß auf einer Durchführung untergebracht

(Abb. 32). Man kann aber auch Lastumschalter und Wähler konstruktiv vereinigen und unter Deckel des Transformators unterbringen (Abb. 33); auch hierbei muß wegen der Gefahr der Verschmutzung das Öl des Lastumschalters vom Öl des Transformators getrennt sein.

Bei Stufeneinstellung einer in Stern geschalteten Wicklung legt man die Anzapfungen in die Nähe des Sternpunktes. Wegen der dort noch kleinen Spannungsdifferenzzwischen den Phasen können die Lastumschalter der drei Phasen auf eine gemeinsame Grundplatte gesetzt werden, was zu einer besonders günstigen konstruktiven Lösung führt. Die Grundplatte selbst bekommt Sternpunktspotential und muß hierfür gegen den Kessel des Transformators isoliert sein, die drei Lastschalter brauchen nur für die Stufenspannung gegeneinander isoliert zu werden. Der dreiphasige Wähler ist ebenfalls um eine einzige Achse gruppiert.

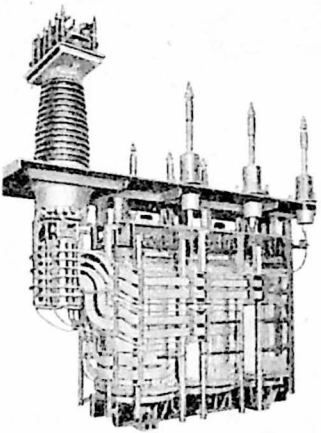


Abb. 32. 110 kV-Transformator mit Regelung im Sternpunkt der 100 kV-Wicklung.

Zur Verdoppelung des Einstellbereiches kann die Stufenwicklung mittels eines stromlos schaltenden Wendeschalters zur Stammwicklung zu- oder gegengeschaltet werden; sie kann auch zu dem gleichen Zweck an eine weitere Anzapfung der Stammwicklung angelenkt werden (Abb. 34).

Der Einstellbereich übersteigt selten $\pm$ 20%. Die Stufenspannung liegt meist zwischen 1% und 2,5%. Daraus ergeben sich Stufenzahlen von $\pm$ 7 bis $\pm$ 13.

Die Notwendigkeit, die Transformatorenwicklung anzuzapfen, wirft ein neues Problem auf. In Abschnitt 5 ist auf die

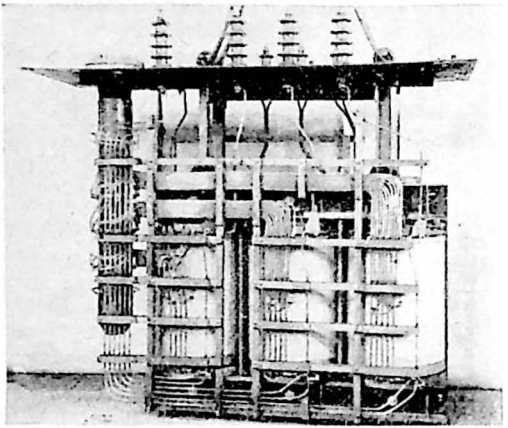


Abb. 33. 6000 kVA-Transformator mit versenkt im Transformatorkasten angeordnetem Lastumschalter.
Der Schalter liegt im Sternpunkt der 20 kV-Wicklung.

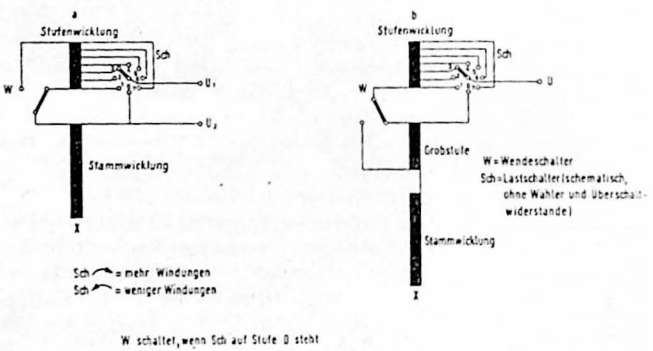



Abb. 34. Verdoppelung des Regelbereichs durch a) Zu- und Gegenschaltung, b) Anlenkung mittels Grobstufe.

Kräfte hingewiesen, die auftreten, wenn die Wicklungen eine Längenunsymmetrie aufweisen. Dies würde aber bis zur Grenze des vollen Einstellbereiches eintreten, wenn man die Anzapfungen aus der Zylinderwicklung oben oder unten herausschalten würde. Bei kleinem Einstellbereich kann es noch vertretbar sein, die zu- und abzuschaltenden Windungen axial symmetrisch verteilt längs des Wickelzylinders anzuordnen, bei großem Einstellbereich ist die Schaltspule die allein mögliche Lösung (Abb. 35). Bei der Schaltspule werden alle Windungen, die zum Einstellen der Spannung dienen, auf einem besonderen Zylinder untergebracht, der konzentrisch zur

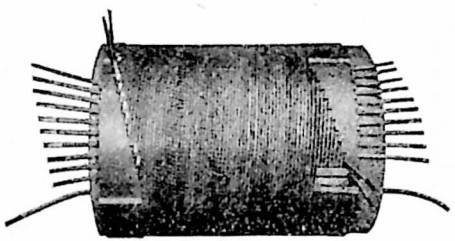


Abb. 35. Schaltspule eines Großtransformators.

Hauptwicklung liegt. Die Windungen jeder Stufe werden über die ganze Länge der Schaltspule gleichmäßig aufgewickelt. Die Drähte aller Stufen laufen also parallel, beginnen alle am einen Ende der Schaltspule und enden ebenso gemeinsam am anderen Ende. So wird erreicht, daß der Strombelag der Schaltspule unabhängig von der Zahl der eingeschalteten Stufen stets über die ganze Wicklungslänge gleichmäßig verteilt ist und somit keine Unsymmetriekräfte auftreten können. Die Größe des Strombelags hängt natürlich von der Zahl der eingeschalteten Stufen ab und die Schaltspule muß in sich kurzschlußfest für die auftretenden Radial- und Kontraktionskräfte sein.

### 13. Kernaufbau

Der Kern des Transformators kann aus den in Abschnitt 3 angegebenen Gründen nicht massiv ausgeführt werden. Er

wird aus Blechen von 0,35 mm Dicke aufgebaut, und zwar derart, daß die Schichtebenen in Richtung des Magnetflusses verlaufen. Gegeneinander werden die Bleche durch eine Lackschicht isoliert. Da die Spannungsdifferenzen zwischen benachbarten Blechen nur kleine Bruchteile von 1 V betragen, dürfen die Isolierschichten dünn sein, nehmen also nur wenig von dem kostbaren Raum innerhalb der Wicklung weg, der möglichst weitgehend mit Eisen angefüllt werden soll. Gegenüber einem massiven Kern gehen trotzdem infolge der Blechisolation und der Unebenheiten des Bleches 6—10% des mit Eisen gefüllten Raumes verloren.

Der Zwang, den kreisförmigen Querschnitt innerhalb der Wicklung möglichst gut mit Eisen zu füllen, diktiert auch die Form der Schenkel, die im Querschnitt nicht, wie es für den Aufbau am einfachsten wäre, quadratisch werden, sondern wie es Abb. 36 zeigt, feinstufig abgesetzt sind. Während der quadratische Schenkel die theoretische Kreisfläche nur zu etwa 64% füllt, erreicht man mit gestuften Querschnitten Füllfaktoren über 90%. Der Mehraufwand durch die Vielzahl der Blechschnitte macht sich durch die Möglichkeit, den gegebenen Querschnitt auf kleinstem Raum unterzubringen, bezahlt.

Die Joche werden genau so gestuft ausgeführt wie die Schenkel.

Um dem Kern einen besseren Zusammenhalt zu geben und um zu vermeiden, daß die Stoßstellen zwischen in Richtung des Flusses aufeinanderfolgenden Blechen in einer Querschnittsebene liegen, werden die Bleche auch in verschiedenen Längen geschnitten und nach einem Schichtplan so gelegt, daß eine Stoßfuge jeweils zwischen durchlaufenden Blechen liegt. Der Fluß hat an solchen Stoßstellen die Möglichkeit, rechts und links in die Nachbarbleche überzutreten, den Luftspalt zu umgehen, um dann wieder in seine ursprüngliche Bahn im nächsten Blech zurückzukehren (Abb. 37). Würde man alle Stoßstellen in eine Ebene legen, so müßte der Gesamtfluß einen Luftspalt überwinden, der wegen seines hohen magnetischen Widerstandes auch bei kleiner Länge viele AW verbrauchte, d. h. den Leerlaufstrom erheblich vergrößerte.

Transformatoren mit sog. stumpf gestoßenem Joch, bei denen der getrennt geschichtete Jochbalken unter Zwi-

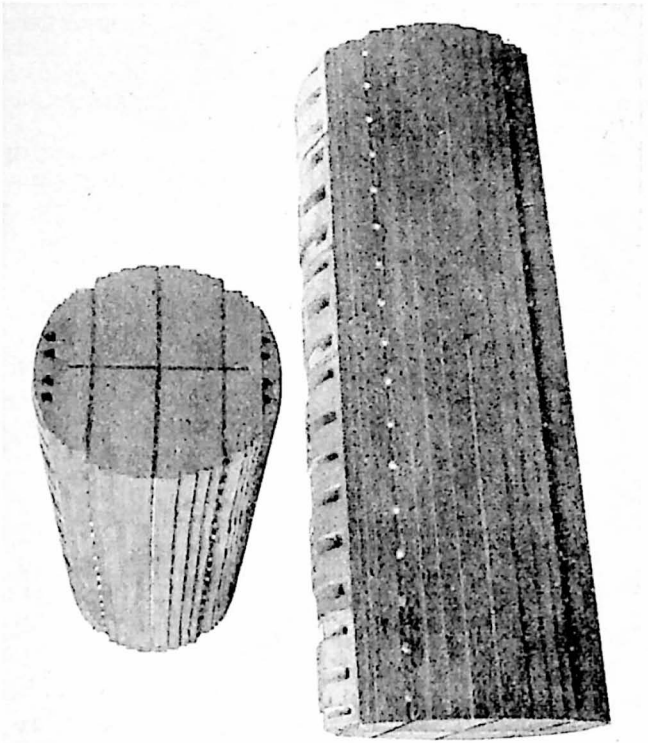


Abb. 30. Treppenförmig gestufter Kern eines Großtransformators mit Kühlschlitzen parallel und quer zur Schichtebene.

schenlage von Hartpapier-Isolation auf die drei Schenkelstümpfe gelegt und dann mittels schwerer Preßkonstruktionen verspannt wird (Abb. 38), haben solche Luftspalte und erfordern auch bei Großtransformatoren 8—10% Magneti-

sierungsstrom, wogegen gleich große Transformatoren mit eingeschichteten Jochblechen nur 1—3% Magnetisierungsstrom brauchen. Trotz der Unbequemlichkeit, nach dem Aufstecken der Wicklungen die Joche Blech für Blech einschichten zu müssen, hat man sowohl aus konstruktiven Gründen (Fortfall der Preßkonstruktion) als auch mit Rücksicht auf die Magnetisierungsströme auch bei den größten Leistungen das stumpf gestoßene Joch fast überall zugunsten des eingeschichteten verlassen.

Um den Kernblechen Zusammenhalt zu geben, müssen sie verspannt werden. Die Joche werden zwischen Längsbalken

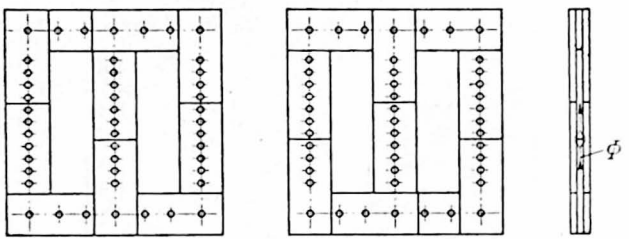



Abb. 37. Blechschichtplan und Verlauf des Flusses an Stoßstellen.

gepreßt, die bei Großtransformatoren aus Eisenrahmen, bei kleinen und mittleren Transformatoren aus Holz bestehen und durch Querbolzen zusammengezogen werden. Die Schenkelbleche werden ebenfalls durch Preßplatten mittels Bolzen zusammengehalten. Alle Bolzen müssen gegen die Kernbleche durch Überschieben von Isolierhülsen sorgfältig isoliert werden, damit nicht der Bolzen die Blechisolation überbrückt, wodurch Zusatzverluste und Eisenbrand entstehen können.

Da die Bolzenlöcher in den Blechen aktives Material kosten, den Fluß einengen und damit in der Nähe der Bolzen die Induktion und die Eisenverluste steigern, ist man bestrebt, mit möglichst wenig Bolzen auszukommen. Kerne für Transformatoren bis zu mehreren 1000 kVA werden heute bolzenlos

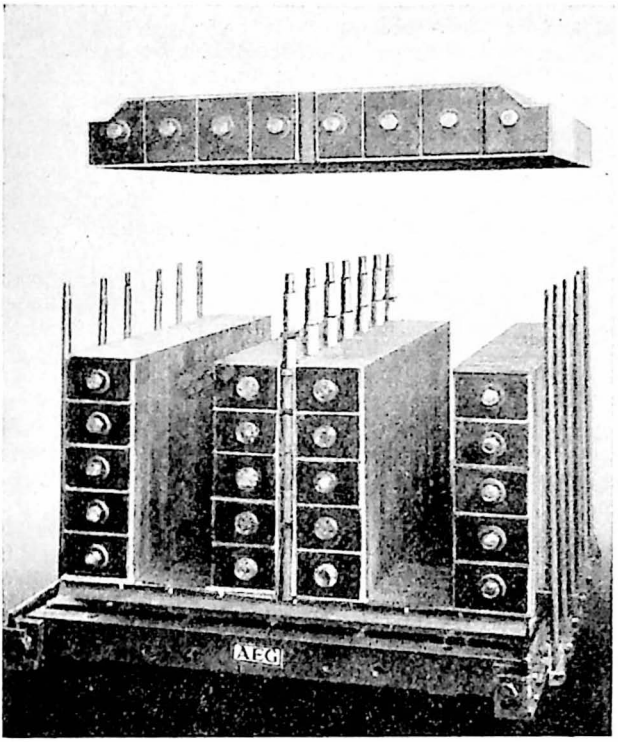



Abb. 38. Stumpfgestoßenes Joch beim Lokomotiv-Transformator (Bauart AEG).

ausgeführt, wobei die Bleche der Kerne durch Umbandelung und durch die Tragzylinder der Wicklung, die Jochbleche nur durch die Jochbalken zusammengehalten werden.

Bei großen Transformatoren reicht die Kernoberfläche nicht aus, um die im Eisen erzeugte Verlustwärme abzu-

führen. Man muß Kühlschlitze im Kern unterbringen, durch die das Öl zirkulieren kann.

Wegen der Isolation zwischen den Blechen ist der Wärmefluß in der Schichtebene größer als quer dazu. Für Blech von 0,35 mm Stärke ist z. B. die Längsleitfähigkeit 2—2,8 W/dm °C je nach der Höhe des Siliciumgehaltes und die Querleitfähigkeit nur 0,25 W/dm °C bei Lackierung. Für die Wärmeabgabe eines Kernpaktes an das Öl wird jedoch dieses Mißverhältnis gemildert durch die in beiden Fällen hinzukommende Wärmeübergangszahl Eisen-Öl, die etwa 1 W/qdm °C beträgt. Da Kühlschlitze in der Schichtebene leicht durch Einlegen von Distanzleisten zwischen einzelne Kernpakete gewonnen werden können, Schlitze quer zur Schichtebene dagegen gestanzt werden müssen, sind Querschlitze nur bei Kernen von sehr großen Transformatoren anzutreffen, aber auch nur dort notwendig.

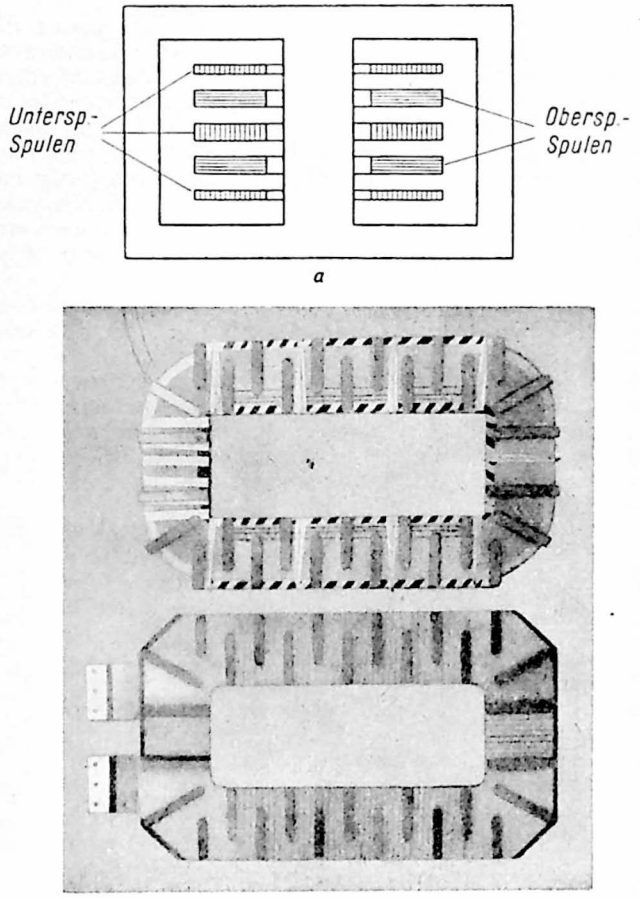
Der Kern des Transformators wird meist konstruktiv mit dem Deckel vereinigt, an dem er im Ölkessel hängt, so daß er den Boden gerade berührt. Am Boden ist der Kern dann weiter gegen den Kessel seitlich abgestützt, um ihn gegen Verschiebung beim Transport zu sichern.

Schließlich ist noch zu erwähnen, daß der Kern selbst und alle vom Kern isolierten Bolzen und Preßplatten zu erden sind, um kapazitive Aufladungen von Metallteilen ohne definiertes Potential zu vermeiden. Die Erdverbindungen sind so zu legen, daß sie niemals einen geschlossenen Kreis, d. h. eine Kurzschlußwindung um Schenkel oder Joch bilden.

### 14. Wicklungsaufbau

Die wichtigsten im Transformatorenbau verwendeten Wicklungsarten sind die Scheibenwicklung, die Röhrenwicklung, die Spulenwicklung und die Lagenwicklung.

Die erstgenannte Scheibenwicklung unterscheidet sich grundsätzlich von allen anderen Wicklungsarten dadurch, daß Primär- und Sekundärwicklungen in zwei oder mehreren abwechselnd aufeinanderfolgenden Scheibenspulen axial übereinander auf den Kern aufgeschoben sind (Abb. 39),




*a*

*b*

Abb. 39. Scheibenwicklung. *a* schematischer Aufbau beim Mantel-Transformator; *b* Unterspannungs-(unten) und Oberspannungs-Wicklungsscheiben (oben).

während allen anderen Wicklungsarten gemeinsam ist die konzentrische Anordnung von Primär- und Sekundärwicklung um die Kernsäule. Da die Scheibenwicklung erfordert, daß jede Oberspannungsspule gegen die benachbarten Unterspannungsspulen voll isoliert ist, wird sie bei höheren Spannungen unwirtschaftlich wegen des großen Isolationsaufwandes; außerdem ist sie überspannungstechnisch ungünstig und schließlich noch im Werkstattaufbau schwieriger als alle anderen Spulenarten. Die Scheibenwicklung ist daher fast ganz verschwunden, weshalb auch auf ihre theoretische Behandlung im I. Teil des Buches verzichtet wurde.

Von den Zylinderwicklungen besitzt die Röhrenwicklung den einfachsten Aufbau. Sie wird einlagig oder mehrlagig fortlaufend über die ganze Länge des Wickelzylinders so gewickelt, daß Draht auf Draht liegt. Die notwendige mechanische Festigkeit gegenüber den Kurzschlußkräften hat eine solche einlagige Röhre nur, wenn die Leiter aus Profilkupfer nicht zu kleinen Querschnitts bestehen. Die Röhrenwicklung wird z. B. als Unterspannungswicklung gebaut, wenn die Stromstärken der Niedervoltseite einen entsprechenden Leiterquerschnitt erfordern.

Die Spulenwicklung wird, je nachdem, ob Rund- oder Profildraht gewählt werden muß, in zwei verschiedenen Formen gebaut. Bei Runddraht werden auf der Wickelmaschine sog. Doppelspulen (Abb. 40) hergestellt, die dann übereinander auf den Schenkel gesteckt und in Reihe geschaltet werden. Die Doppelspule ist aus zwei Einzelspulen zusammengesetzt, deren innenliegende Drahtenden vor dem Aufeinanderlegen verlötet und isoliert werden. Man vermeidet so die elektrisch sehr ungünstige Lösung, die inneren Enden der Einzelspulen zwecks Verlötung mit der Nachbarspule radial an den anderen Windungen vorbei nach außen führen zu müssen.

Bei Verwendung von Profildraht werden einzelne Spulen gewickelt, die ebenfalls axial übereinander angeordnet abwechselnd am inneren und äußeren Durchmesser des Wicklungszylinders miteinander verlötet werden müssen. Da die Lötstellen auftragen, also Unstetigkeitspunkte des elektri-

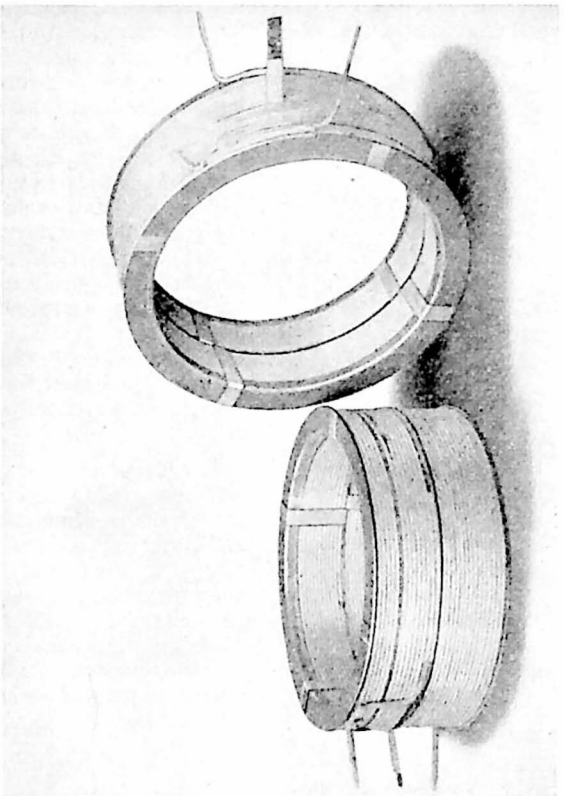


Abb. 40. Doppelspulen eines 160 kVA Transformators, 5 kV Oberspannung.

schen Feldes darstellen, außerdem nachträglich von Hand isoliert werden müssen, ist der verlöteten Spulenwicklung die verstürzte Wicklung vorzuziehen, die aus einem fortlaufend isolierten Draht auf der Wickelbank hergestellt

werden kann. Der Wickler hat dabei jede zweite Spule erst provisorisch aufzuwickeln, zieht deren oberste Lage ab, legt sie nach unten und schiebt die folgenden Windungen darüber (Abb. 41), so daß er schließlich eine scheinbar von außen nach innen gewickelte Spule hat, die anders nicht zu wickeln ist. Da nach der Verstürzung das ablaufende Drahtende am inneren Durchmesser des Wicklungszylinders liegt, kann die nächste Spule normal aufgewickelt werden; dann folgt wieder eine zu verstürzende Spule, usf.

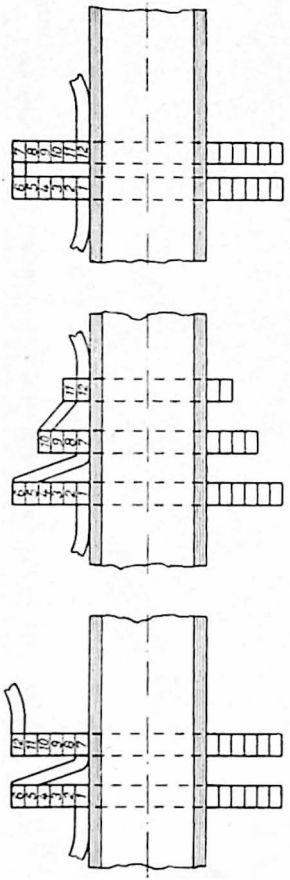



Abb. 41. Verstürzte Wicklung. *a*, *b*, *c*: Umlegen der Windungen in der verstürzten Spule.

Werden bei Transformatoren großer Leistung die Drahtquerschnitte so groß, daß erhebliche Zusatzverluste (vgl. Abschn. 6) zu erwarten sind, so unterteilt man den Leiter in mehrere, gegeneinander isolierte, aber am Anfang und Ende parallel geschaltete Drähte, die im Zuge der Wicklung so verdrillt werden, daß jeder Draht jede geometrische Lage innerhalb des Leiterbündels für eine bestimmte Länge innehat, wodurch der Einfluß der Stromverdrängung in Summe aufge-

hoben wird. Solche Wicklungen heißen Wendelwicklungen (Abb. 42).

Schließlich kann man die Windungen auch noch so in dem Wickelraum unterbringen, daß man eine Reihe von Lagen fortlaufend übereinander wickelt, wie Fäden auf der Garn-

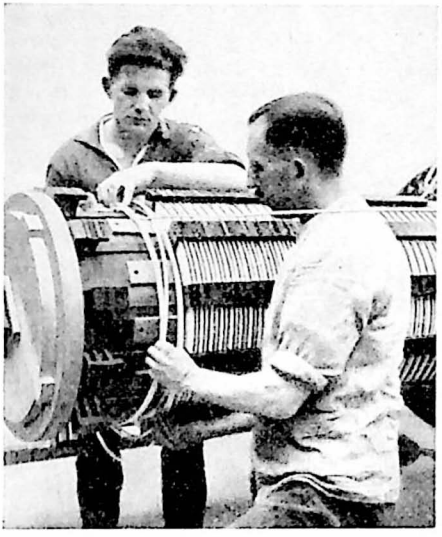


Abb. 41d. Herstellung der verstürzten Wicklung.

rolle. Man kommt so zur Lagenwicklung, die besonders kurzschlußfest sein soll. Ihr weiterer Vorzug ist, daß die Isolation zwischen der Oberspannungs- und Unterspannungsspule im Normalbetrieb elektrisch fast nicht beansprucht wird, wenn die Oberspannungsseite in Stern geschaltet ist und die der Unterspannungswicklung benachbarte Lage der Oberspannungswicklung am Sternpunkt der Wicklung liegt, der im Normalbetrieb praktisch spannungslos ist. Der Hauptvorteil der Lagenwicklung ist aber ihre Überspannungssicher-

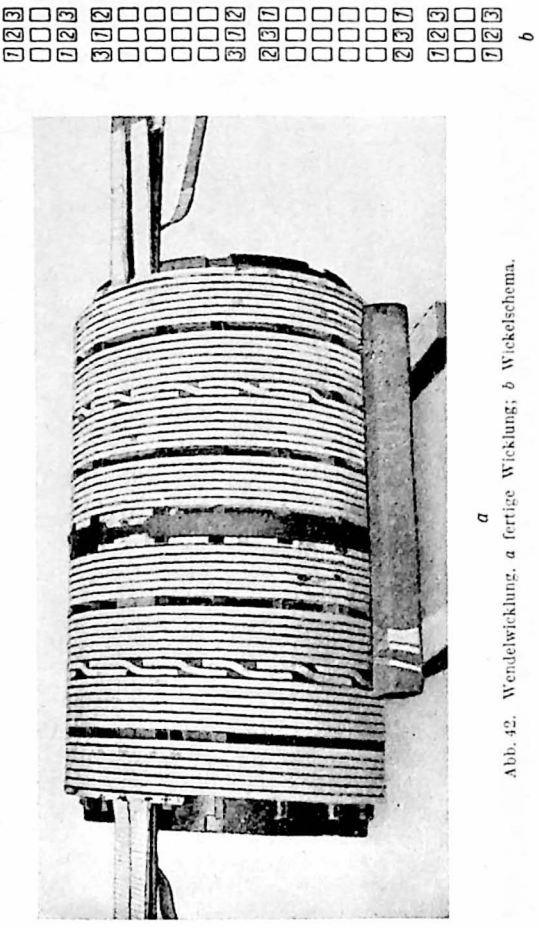



Abb. 42. Wendelwicklung. *a* fertige Wicklung; *b* Wickelschema.

heit, da sie bei richtigem Aufbau schwingungsfrei ist (vgl. Abschnitt 21). Ihr Nachteil ist ihr kleinerer Füllfaktor.

Als Isolation für die Wickeldrähte kommt bei Öltransformatoren ausschließlich Weichpapier zur Anwendung, das je nach der Spannungshöhe in mehreren Lagen maschinell aufgewickelt wird und hohe elektrische Festigkeit mit Elastizität und Wärmebeständigkeit verbindet. Lackisolierte Drähte sowohl mit kreisförmigem als auch rechteckigem Querschnitt werden dank der vorzüglichen Eigenschaften der neuen Isolierlacke in steigendem Maß im Transformatorenbau eingeführt. Bei Trockentransformatoren verwendet man zur Isolierung Papier mit Baumwolle umsponnen, weil die Wicklungen von Trockentransformatoren zur Verhinderung von Feuchtigkeitsaufnahme mit Lack getränkt werden, den die Baumwolle besser aufsaugt als Papier. Auch Glasseide mit Lack- oder Silikonisolation finden bei Trockentransformatoren Verwendung.

Die Anfangs- und Endwindungen oder -Spulen werden bei Hochspannungswicklungen stets stärker isoliert als die übrigen Windungen oder Spulen der Wicklung, weil sie elektrisch besonders stark beansprucht werden, wenn eine Überspannung mit steiler Stirn den Tranformator trifft. Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, diese verstärkte Isolation nicht plötzlich, sondern gestuft in die Normalisolation übergehen zu lassen.

Die Isolation, welche die gesamte Wicklung gegen die Nachbarwicklung und gegen die geerdeten Konstruktionsteile und den Kern schirmt, heißt Hauptisolation. Sie besteht im allgemeinen aus Hartpapier- oder Weichpapierzylindern, die zwischen Oberspannungs- und Unterspannungswicklung oder Wicklung und Eisenkern eingeschoben sind und gleichzeitig als Spulenträger dienen können. Bei Spannungen über 60 kV werden die Isolierzylinder am oberen und unteren Spulenende horizontal abgewinkelt oder Winkelringe eingezogen (Abb. 43), wodurch der Raum zwischen den Spulenenden und dem oberen und unteren Joch eine höhere elektrische Festigkeit erhält als bei freier Ölstrecke ohne die Papierbarrieren. Man kann somit die Abstände zwischen Wicklung und Joch erheb-

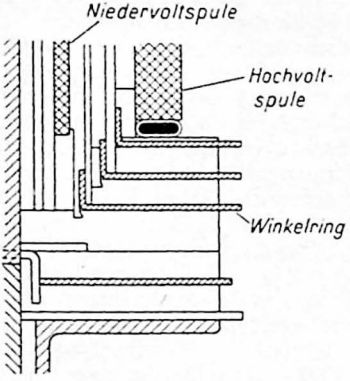



Abb. 43. Hauptisolation mit Winkelringen.

lich verringern, was bei Großtransformatoren bedeutende Materialersparnis mit sich bringt.

Großen Wert hat der Konstrukteur auf einen mechanisch einwandfreien Aufbau der Wicklung zu legen. Die Kurzschlußkräfte bewirken, wie in Abschnitt 5 geschildert, eine kräftige Kontraktion der Wicklung in axialer Richtung und eine Druckbeanspruchung radial nach außen oder innen bei der äußeren bzw. inneren Wicklung. Runddrahtspulen verleiht man die nötige Festigkeit durch Verkleben der Windungen mit einem besonderen Lack, der nach dem Trocknen sehr fest wird und die Spulen zu einem starren Körper zusammenfaßt. Bei Spulen aus Profildraht, der den Kräften in radialer Richtung meist gut gewachsen ist, kommt es vor allem darauf an, die Axialkräfte durch Preßspanstücke abzufangen, die in regelmäßigen Abständen zwischen die Spulen geschoben werden. (Vgl. Abb. 41 d.) Eine kräftige Verspannung der Wicklung mittels Preßkonstruktionen an den Jochen verleiht der Wicklung die Festigkeit, die eine Bewegung der Windungen unter dem Einfluß der Kurzschlußkräfte verhindert und damit Durchscheuern der Drahtisolation und hiermit verbundene Windungsschlüsse ausschließt. Die Preßspanstücke müssen so über den Umfang verteilt werden, daß Durchbiegungen der Windungen zwischen den Stützpunkten nicht auftreten können, andererseits aber auch noch genügend freie Lücken zur Abfuhr der Verluste zur Verfügung stehen.

Damit ist die Frage der Wicklungskühlung aufgeworfen, die besonders bei Großtransformatoren wegen des immer un-

günstiger werdenden Verhältnisses von Kupfervolumen zu Oberfläche bei steigender Leistung, d. h. steigendem Kupfergewicht, eine wichtige Aufgabe ist. Ihre Lösung setzt einige Erfahrung voraus, kommt es doch darauf an, den Wickelraum so mit den Windungen auszufüllen, daß genügend Spalte und Durchbrüche vorhanden sind, um eine Ölzirkulation um möglichst große Längen der Leiter zu ermöglichen und damit Wärmestauungen zu unterbinden, ohne verschwenderisch mit dem wertvollen Raum umzugehen, der aus wirtschaftlichen Gründen soweit wie irgend möglich mit aktivem Material angefüllt werden sollte. Da die Windungsisolation die Wärmeabfuhr stark beeinflußt, lassen sich die Abkühlungsverhältnisse rechnerisch nur schlecht erfassen, so daß man — wie gesagt — auf Erfahrungswerte angewiesen ist. Man rechnet mit einer Flächenbelastung von etwa 1000—2000 W Verlustwärme pro $m^2$ Spulenoberfläche, um die zulässige Wicklungserwärmung nicht zu überschreiten. Winkelringisolation muß dem zwischen den Isolierzylindern aufsteigenden Öl den Weg nach außen ermöglichen; bei Lagenwicklung müssen zwischen den Lagen Kühlkanäle eingezogen sein, um der Wärme aus den inneren Lagen der Wicklung freien Austritt zu lassen.

## 15. Durchführungen

Der Wert richtig ausgewählter und gebauter Durchführungen ist für das betriebliche Verhalten des Transformators von nicht zu unterschätzendem Wert, weil schlechte Durchführungen zu dauernden Schwierigkeiten, besonders hinsichtlich der Öldichtigkeit, führen. Hierin und in der leichteren Montage ist der Grund zu suchen, weshalb die in den Flansch gekittete Durchführung kittlosen Durchführungen (Abbildung 44) weichen mußte, bei denen der Porzellanüberwurf mittels Preßschrauben auf den Flanschboden gedrückt wird. Als Dichtungsmaterial wird Klingerit, Kork oder ölfester Gummi verwendet. In gleicher Weise wird der Durchführungsbolzen gegen den Kopf des Isolators gedichtet.

Eine Entlüftungsschraube am Kopf der Durchführung läßt bei der Füllung des Transformators die Luft aus der Durchführung entweichen.

Der Durchführungsbolzen wird isoliert, und bei Spannungen über 60 kV werden außerdem zur Erhöhung der elek-

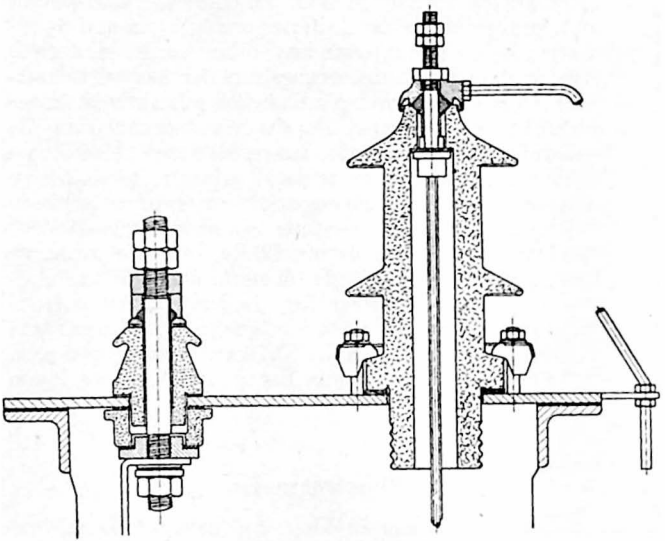


Abb. 44. Schnitt durch kittlose Hoch- und Niederspannungs-Durchführung.

trischen Festigkeit ein oder mehrere konzentrische Hartpapier-Rohre über den Bolzen geschoben, zwischen denen dann freie Ölstrecken stehen.

Bei Spannungen oberhalb 110 kV ist das Durchführungsproblem mit wirtschaftlich erträglichen Mitteln nur mit Hilfe der Kondensatordurchführung zu lösen. Bei der stets vorzusehenden Freiluftausführung muß das aus dem Deckel herausragende Ende der Hartpapierdurchführung durch einen Porzellanüberwurf vor den Einflüssen der Witterung geschützt

werden. Der Raum zwischen Porzellan und Durchführung wird mit Öl gefüllt, tropfdicht gegen den Kessel des Transformators abgeschlossen, jedoch mit einem eigenen kleinen Ausdehnungsgefäß versehen. Hierdurch wird erreicht, daß bei Beschädigungen des Porzellans nicht der gesamte Inhalt des Hauptausdehnungsgefäßes an der defekten Durchführung auslaufen kann (Abb. 45).

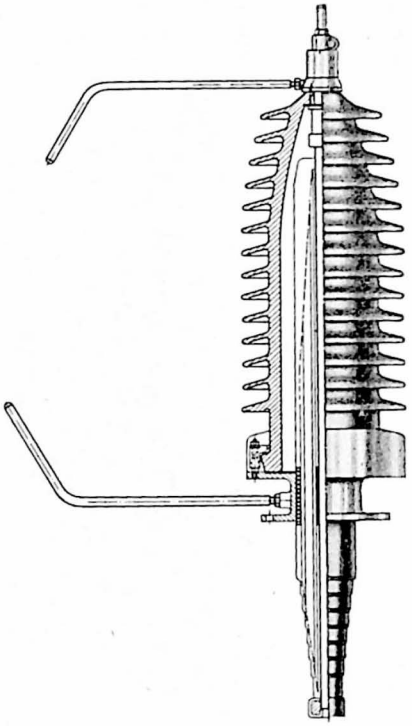


Abb. 45. Schnitt durch eine Kondensator-Durchführung der Reihe 110.

Bei Aufstellung von Transformatoren in unterirdischen Werken oder an Orten mit extremer Verschmutzungsgefahr (Schwelwerke, Chemische Industrie) wird die elektrische Energie auch auf der Hochspannungsseite mit Kabeln abgeführt. Anstelle einer Freiluftdurchführung wird dann der Kabelendverschluß so konstruktiv mit dem Transformatorkessel verbunden, daß die Verbindungsstelle Kabel—Wicklung in einem Anbaukasten unter Öl liegt.

Die Stoßüberschlagsfestigkeit der Durchführungen ist so auf die Stoßfestigkeit im Innern des Transformators ab-

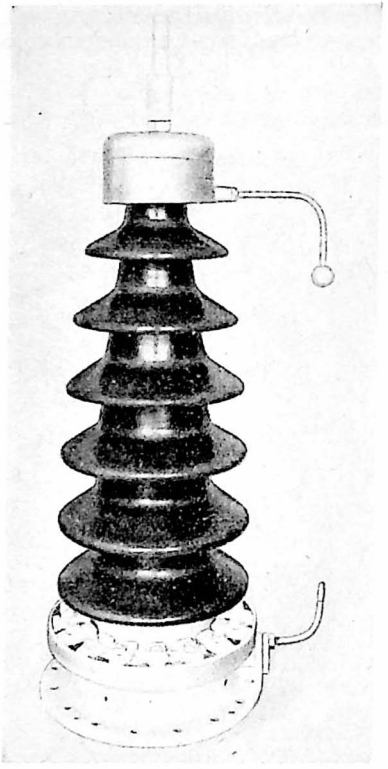


Abb. 46. Kittloser Freiluftisolator für 60 kV mit Parallel-Funkenstrecke.

zustimmen, daß bei Überspannung der Transformator leichter über Deckel als unter Deckel überschlägt. Freiluft-Transformatoren müssen wegen Feuchtigkeit und Verschmutzung höhere Durchführungsisolatoren bekommen, was eigentlich wiederum eine erhöhte Innenisolation des ganzen Transformators bedingte, um das richtige Verhältnis zwischen Außen- und Innenisolation zu erhalten. Einfacher ist es, die Überschlagsfestigkeit der Freiluftdurchführungen durch eine Parallelfunkenstrecke (Abbildung 46) auf der Höhe der Festigkeit der Innenraumdurchführung zu halten, wobei gleichzeitig die Funkenstrecke bei einem Überschlag den Lichtbogen vom Porzellan fern hält.

Zur Vermeidung einer Erhitzung des Deckelblechs in der Nähe der Durchführungen infolge von Wirbelströmen im Eisen setzt man bei Stromstärken über 600 A die Durchführungen auf Platten aus unmagnetischem Material.

## 16. Kessel und Kühlung

Die Gestalt des Ölkessels der Transformatoren wird diktiert von der Art der Kühlung. Nur Transformatoren sehr kleiner Leistung (bis ca. 30 kVA) sind in der Lage, ihre Verlustwärme ohne Überschreitung der vom VDE auf 60° festgesetzten Öl-Übertemperatur durch die Fläche eines Glattblechkastens an die Umgebung abzuführen. Bei größerer Leistung werden die Verhältnisse ungünstiger, weil das Volumen und damit das Gewicht des aktiven Materials und damit wiederum bei gleicher Induktion und Stromdichte auch die Verluste stärker wachsen als die Oberfläche. Man muß also die Kühlfläche des Kessels künstlich vergrößern. Bis zu einigen 1000 kVA kann man die Seitenwände des Kessels aus gewelltem Blech herstellen (Abb. 47), wodurch die Kühlfläche vervielfacht wird. Eine andere Möglichkeit, Kühlfläche zu schaffen, bietet der Röhrenkessel, der im Vergleich zum Wellblechkessel größere mechanische Sicherheit gibt und erlaubt, Transformatoren bis zu vielen tausend kVA selbstkühlend zu bauen. Hierbei dürfen bis zu 4 Rohrreihen übereinander angeordnet werden, durch die das Öl in natürlichem Umlauf zirkuliert. Eine weitere Vermehrung der Kühlrohre bringt keinen großen Erfolg mehr, weil für die innenliegenden

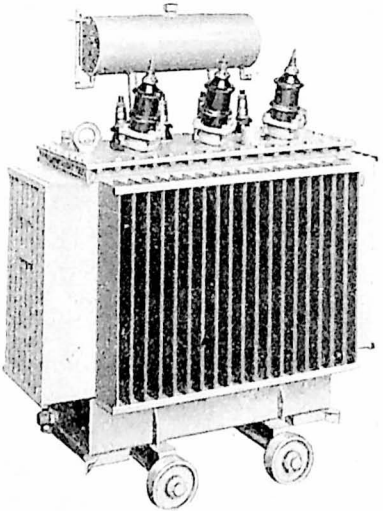


Abb. 47. Wellblechkessel, 10 kV-Transformator.

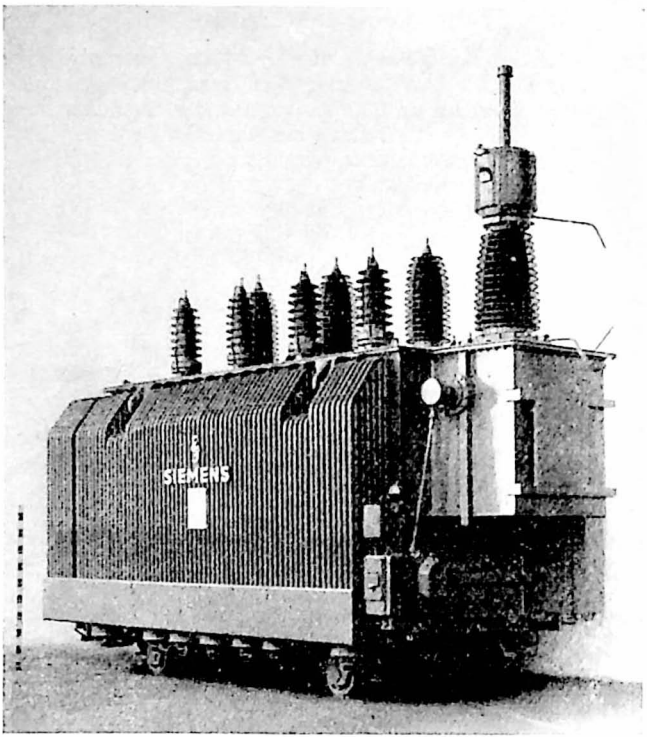



Abb. 48. 40 MVA-Transformator 112 ± 22%/50 kV mit Harfenrohrkessel, F-Kühlung, (Bauart SSW).

Rohre der obere und untere Absatzpunkt immer näher zusammenrücken, die Rohre also nicht nur kürzer werden, sondern auch ein kleineres Temperaturgefälle abgreifen und endlich durch die weiter außenliegenden Rohre vor der vorbeistreichenden Luft abgedeckt werden. Eine wirkungsvollere Kühlung ergeben die sog. Rohrharfen, bei denen die überein-

anderliegenden Rohre oben und unten in ein horizontal aus dem Kasten ragendes Sammelrohr münden (Abb. 48). Hierdurch ist für alle Rohre die volle Temperaturdifferenz

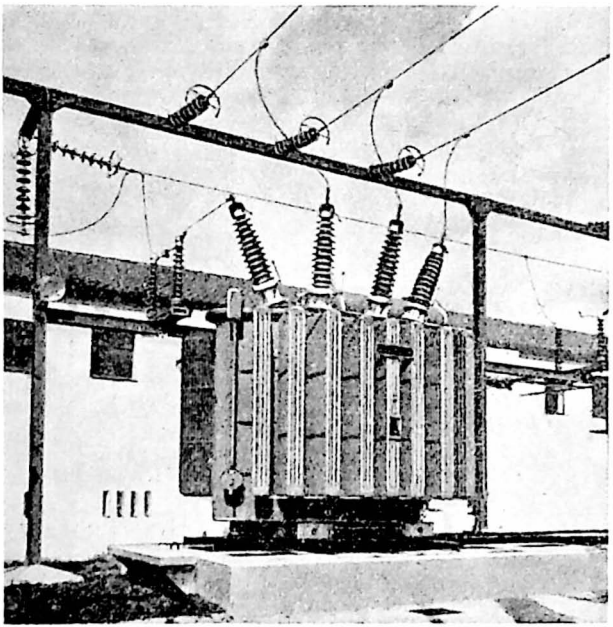


Abb. 49. Radiatorenkessel, 12500 kVA-Transformator, 100 kV Oberspannung· S-Kühlung, (Bauart BBC).

zwischen oben und unten wirksam. Will man noch größere Leistungen rein selbstkühlend bauen (Kühlart S nach VDE), so muß man zum Radiatorenkessel übergehen (Abb. 49). Hier besteht die Möglichkeit, mit einem Glattblechkessel das Bahnprofil voll auszunutzen und erst am Aufstellungsort die Radiatoren anzuflanschen.

Alle vorstehend beschriebenen Kastenformen können durch Beblasung, z. B. mittels Schraubenradlüftern, die von unten oder seitlich horizontal Luft zwischen Kühlrippen, Röhren oder Radiatoren blasen, beträchtlich (bei Wellblech und Radiatorenkästen um 60—80%, bei Rohrharfen bis 100%) in ihrer Wärmeabgabe gesteigert werden, so daß sich also bei Verwendung dieser Zusatzkühlung (F nach VDE) die mit S-Kühlung

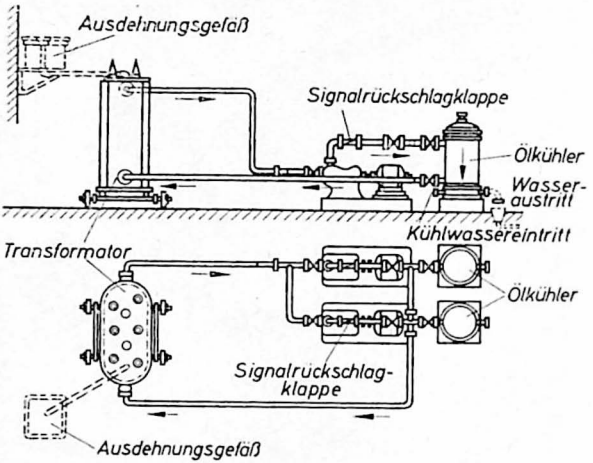



Abb. 50. Schema einer Ölumlaufkühlanlage mit Wasserkühlung.

erreichbaren Leistungsgrenzen entsprechend verschieben. Die mögliche Leistungssteigerung hängt vom Verhältnis der Eisen- zu den Kupferverlusten ab. Beträgt dieses z. B. 1 : 4, so läßt sich die Transformatorleistung um 42% steigern, wenn man durch Anblasung die Wärmeabgabe des Kessels um 80% steigerr. Voraussetzung hierfür ist, daß der bei erhöhter Leistung gestiegene Temperatursprung von Wicklung zu Öl nicht auf unzulässig hohe Wicklungstemperaturen führt. Ferner ist zu beachten, daß hierbei die Kurzschlußspannung proportional mit der Leistungssteigerung wächst.

Eine häufig bei Großtransformatoren angewandte Kühlart ist die Wasserkühlung. Das warme Öl wird unter dem Deckel des Glattblechkessels abgesaugt, durch einen von Kühlwasser durchströmten Röhrenkühler gedrückt und tritt am Boden des Transformatorenkessels wieder in diesen zurück. (Kühlung WU, Abb. 50). Durch den erzwungenen Ölumlauf und

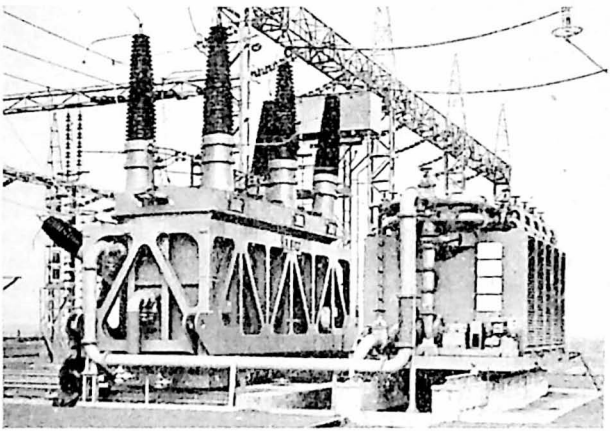


Abb. 51. Transformator für 300 MVA Durchgangsleistung, 220/300 kV mit Ölumlaufkühlung. Luftkühler getrennt vom Transformator angeordnet.

die im Vergleich zur Luft niedrigere Wassertemperatur wird eine so wirksame Kühlung erreicht, daß WU-gekühlte Transformatoren meist mit ziemlich niedriger Betriebstemperatur laufen, was sicherlich zur Verlängerung des Lebens der so gekühlten Transformatoren beiträgt.

Häufig macht die Beschaffung von Kühlwasser am Aufstellungsort von Großtransformatoren Schwierigkeiten. In solchen Fällen bedient man sich der FU-Kühlung, die wie die WU-Kühlung künstlichen Ölumlauf, jedoch Luftkühler an Stelle von Wasserkühlern besitzt (Abb. 51). Der Voll-

ständigkeit halber sei endlich noch die SA-Kühlung erwähnt. Hierbei wird die wirksame Kühlfläche in Gestalt einer Radiatorenbatterie — meist erhöht — neben dem Transformator aufgestellt, wobei sich infolge der Thermosyphonwirkung ein natürlicher Ölumlauf einstellt.

Warmes Transformatorenöl soll nicht mit dem Luftsauerstoff in Verbindung gebracht werden, weil es infolge von Oxydation zu Schlammbildung im Öl kommt. Da andererseits die Temperaturschwankungen zu Volumenveränderungen von 8—10% führen, darf der Kessel nicht vollständig abgeschlossen sein, es sei denn, man läßt unter dem Deckel ein Stickstoffpolster stehen, das die Volumenveränderung aufnimmt, eine Lösung, die nur bei kleinen Transformatoren und niedrigen Spannungen anwendbar ist. Normalerweise erhält der Transformator ein Ausdehnungsgefäß, das bei Transformatoren kleinerer Leistung als Zylinder ausgebildet auf dem Deckel angebracht wird, bei großen Transformatoren rechteckig ist und oberhalb des Deckels auf getrennter Konsole montiert wird. Da das Ausdehnungsgefäß nur mit einem Rohr mit dem Kessel verbunden wird, ist eine Ölzirkulation nicht möglich, so daß im Ausdehnungsgefäß kaltes Öl steht, das von der Luft wenig angegriffen wird. Überdies verringert man die Berührungsfläche meist noch durch Einsatz eines Schwimmers in das Ausdehnungsgefäß, das, wie nun erklärlich, mit gutem Recht auch Ölkonservator genannt wird.

Auf eine besondere Formgebung der Kessel sei noch aufmerksam gemacht: Bei sogen. Wandertransformatoren, das sind Transformatoren, die völlig betriebsfertig bahntransportfähig sind, ist der Kessel mit Kühlern genau dem Bahnprofil angepaßt, die Durchführungen sind nicht auf dem Deckel, sondern an den Stirnseiten angeordnet und das Ausdehnungsgefäß liegt langgestreckt mit trapezförmigem Querschnitt dicht über dem Deckel (Abb. 52).

Es würde weit über den Rahmen des vorliegenden Büchleins führen, wollte man hier eine Theorie der Kühlung von Transformatoren geben. Einige grundsätzliche Betrachtungen und ein paar Zahlenwerte müssen genügen. Die Wärmeabfuhr geschieht durch Leitung, Strahlung und Konvektion. Die

Wärmeleitung hat nur im Innern des Transformators Bedeutung, wo die Verlustwärme durch Leitung aus dem Kern- und Leiterinneren an die Oberfläche von Kern und Wicklung geführt wird. Die weitere Abfuhr der Wärme besorgen dann beim Trockentransformator Strahlung und Konvektion. Erfahrungszahlen besagen, daß bei 60° Übertemperatur im Kupfer pro m² Oberfläche etwa 600 W von freistrahlenden Außenflächen des Trockentransformators durch Strahlung und Konvektion abgeführt werden. Man kann also mit einer Wärmemenge

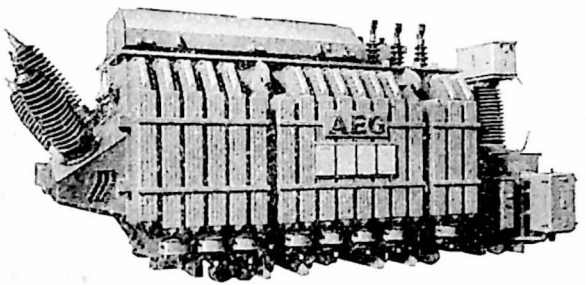



Abb. 52. Wandertransformator 31 500 kVA Reihe 110 mit Lastumschalter im Sternpunkt der 110 kV-Wicklung Radiatoren-Kühler.

von ~ 10 W/°C und m² rechnen. Für Flächen, die an Kanäle grenzen, darf man, sofern diese mindestens 15—20 mm weit sind, bei 60° Übertemperatur nur mit 270 W/m² rechnen.

Die durch Strahlung abgeführte Wärme steht zu der durch Konvektion abgeführten etwa im Verhältnis 3:4 bei Außenflächen; in Kanälen kann praktisch keine Abstrahlung auftreten.

Bei Öltransformatoren tritt das Öl als Zwischenträger der Wärme auf, wobei die durch Leitung und Konvektion vom Transformator auf das Öl übertragene Wärmemenge etwa 80 W/°C und m² ist. Die Temperaturdifferenz zwischen Öl und Wicklung bzw. Kern ist im Mittel etwa 10—20 °C. Bei 70° zulässiger Kupferübertemperatur und nur 50° mittlerer Ölübertemperatur darf man für vertikale Kühlflächen mit 1600 W/m²,

für horizontale Kühlflächen mit 1100 W/m² rechnen. Bei umlaufgekühlten Transformatoren mit nur 45° Übertemperatur im Öl steigen die Werte nochmals um 25%. Das Öl gibt seinerseits nun die Wärme über die Kesseloberfläche, Kühlrohre oder Radiatoren an die Kühlmittel Luft oder Wasser ab.

Bei einer Ölübertemperatur von 55° (60° sind nach VDE höchstens zulässig) in der obersten Schicht gibt ein Glattblechkasten eine Verlustwärme von 600 W/m² ab. Ein 1000 kVA Transformator kann in einem Glattblechkasten untergebracht werden, der eine Oberfläche von ungefähr 7 m² hat und demgemäß 4,2 kW abführen kann, d. h. nur etwas mehr als seine Leerlaufverluste. Größere Transformatoren können über ihren Glattblechkessel nicht einmal die Leerlaufverluste abführen, was bei Transformatoren mit Wasserkühlung zu beachten ist, bei denen auch im Leerlauf die Kühleinrichtung in Betrieb sein muß. Mit Glattblechkasten kommen bei Selbstkühlung nur Transformatoren bis zirka 30 kVA aus.

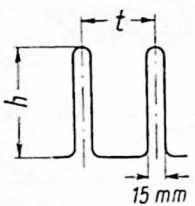


Abb. 53. Wellblech-Profil.

Zur Beurteilung der notwendigen Kühlflächen für Wellblech-, Röhren- und Radiatoren-Kasten sind nachstehend einige Zahlen angegeben.

a) Wellblechkasten:

Die Zahlen gelten für die abgewikkelte Oberfläche des Wellbleches, dessen Profil aus Abb. 53 zu entnehmen ist.

| | $t = 45$ | $t = 60$ | $t = 90$ mm |
|---|---|---|---|
| $h$ mm | W/m² Abwicklung | | |
| 100 | 370 | 405 | 440 |
| 200 | 315 | 350 | 380 |
| 300 | 295 | 335 | 365 |

Die Werte gelten für 55° C Ölübertemperatur unter Deckel und für 1 m Kastenhöhe.

b) Röhrenkasten:

Auch hier gelten die Zahlen für die abgewickelte Rohroberfläche einschließlich der Kastenoberfläche. Es sind Rohre von 50 mm Durchmesser angenommen und eine Teilung der Rohransatzlöcher im Kasten von 75 mm in beiden Richtungen.

| Rohrreihen . . . . . | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| $W/m^2$ Abwicklung . . | 495 | 450 | 415 | 375 | 340 |

Für 55° Temperaturdifferenz zwischen Öl und Luft.

c) Radiatorenkasten:

Radiatoren geben im Mittel 350 $W/m^2$ Abwicklung ab. Bemerkenswert ist, daß die Wärmeabgabe hier von der Zahl der Glieder fast unabhängig ist.

Durch Beblasung der Wellblech-, Röhren- oder Radiatorenkästen läßt sich deren Wärmeabgabe um etwa 80% steigern. Für 6—8 kW abzuführende Verlustwärme je nach Art und Anordnung der Kühlkörper, wird dabei ein Propellerlüfter mit 250 W Leistung und 60 cbm/min Förderung nötig.

Bei umlaufgekühlten Transformatoren werden zur Einhaltung der VDE-Temperaturen nötig:

1,0 l/min und kW Wasser
5,6 l/min und kW Öl
} Kühler-Durchsatz

bei 15° Temperaturzunahme des Kühlwassers und
6,5° Temperaturabnahme des Öls.

Für die Ventilation von Transformatorenzellen rechnet man mit 2,5 cbm Luft je min und kW Verlustwärme.

### 17. Materialaufwand und Materialaufteilung

Bei gegebener Leistung und Übersetzung wird der Materialaufwand für einen Transformator hauptsächlich durch den Wirkungsgrad, den Leerlaufstrom und die Kurzschlußspannung, die Materialaufteilung, besonders durch die Verteilung der Verluste auf Kupfer und Eisen und das Preisverhältnis von Kupfer zu Eisen bestimmt. Schließlich können auch konstruktive Notwendigkeiten, wie Einhaltung des Bahnprofils oder Anpassung an gegebene Zellenmaße, zu

Aufwendungen zwingen, die sonst nicht erforderlich sind. Die Kunst des Berechners und Konstrukteurs ist nun, für die z. T. gegenläufigen und schwer zu vereinbarenden Forderungen den billigsten Transformator zu finden, und ein alter Wunsch ist, hierfür ein Rezept zu haben. Es sei vorausgeschickt, daß es ein solches Rezept zwar nicht gibt, aber doch wenigstens gewisse Richtlinien, bei deren Befolgung man in die Nähe des Optimums kommt. Es genau zu treffen, bleibt der Erfahrung und dem Fingerspitzengefühl des Berechners überlassen, dem in jüngster Zeit die elektronische Rechenmaschine als Helfer zugesellt wurde.

Der Zusammenhang zwischen Materialaufwand und Wirkungsgrad ist leicht zu übersehen. In Abschnitt 3 und 6 wurde gezeigt, daß die Verluste linear mit den Gewichten von Eisen bzw. Kupfer, jedoch quadratisch mit den spezifischen Beanspruchungen (Induktion und Stromdichte) steigen, so daß sich die Verluste nur durch Steigerung des Materialaufwandes, d. h. Verringerung der Beanspruchungen senken lassen. Wie hoch man diesen Aufwand treiben kann, hängt vom Strompreis, den Materialkosten, der Belastungsart und den Kapitalkosten ab, kann also nur von Fall zu Fall entschieden werden. Im folgenden soll nun untersucht werden, wie bei gegebenem Wirkungsgrad am zweckmäßigsten die Verluste auf Eisen und Kupfer verteilt werden.

Um die Zahl der veränderlichen Größen nicht zu groß werden zu lassen, sei vorausgesetzt, daß die spezifischen Beanspruchungen der aktiven Materialien, also die Induktion im Eisen und die Stromdichte im Kupfer, gegeben sind, was bei einem bestimmten Stand der Technik und den Gepflogenheiten eines Werkes auch zutreffen dürfte.

Aus Gl. 2a wird für den Drehstromtransformator durch Multiplikation mit $J \cdot 3$ die Gleichung:

$$N = 4{,}44 \cdot f \cdot B \cdot F \cdot w \cdot J \cdot 3 \cdot 10^{-8}\,[\mathrm{VA}].$$

$F$ ist der Kernquerschnitt. Führt man noch den Leiterquerschnitt $q_l$ ein ($q_l \cdot j = J$) und betrachtet man die Leisfung $N$, die Induktion $B$ und die Stromdichte $j$, sowie die Frequenz $f$ als gegeben, so wird

$$F \cdot q_l \cdot w = \text{const} = 1{,}5 \frac{N}{B \cdot j} 10^5 \text{ für 50 Hz.} \quad \text{(Gl. 24)}$$

$F$ ist in cm², $q_l$ in mm² einzusetzen. Das Produkt von Leiterquerschnitt und Zahl der Leiter ergibt den einseitigen Kupferquerschnitt eines Wickelzylinders $q_w$, so daß

$$F \cdot q_w = \text{const.} \quad \text{(Gl. 24a)}$$

Da das Eisengewicht $F$, das Kupfergewicht $q_w$ proportional ist, sagt das obige Gesetz, daß man bei gleichen spezifischen Beanspruchungen ein und denselben Transformator mit beliebiger Verteilung der Gewichte auf Kupfer und Eisen bauen kann, sofern man nur das Produkt der aktiven Querschnitte konstant hält. Es bleibt also noch ein Freiheitsgrad offen für die Verteilung der Gewichte, über den man verfügen kann durch Festlegung des Verhältnisses der Eisen- zu den Kupferverlusten oder durch die Forderung, bei beliebigem Verlustverhältnis den billigsten Transformator zu bauen. Das günstigste Verlustverhältnis ergibt sich aus den Belastungsverhältnissen des Transformators (vgl. Abschn. 7).

Nach Gl. 7b erhält man durch Einsetzen des Zahlenwertes für $v_{10}$ für eine Blechsorte mit z. B. $v_{10} = 1{,}0$ W/kg

$$p_{fe} = 1{,}0 \cdot G_{fe} \cdot \left(\frac{B}{10.000}\right)^2 [W].$$

Gl. 17 gibt den entsprechenden Zusammenhang für die Kupferverluste

$$p_{Cu} = 2{,}6\, G_{Cu} j^2\, [W], \text{ also wird}$$

$$\frac{p_{fe}}{p_{Cu}} = 0{,}3 \text{–} 5 \frac{G_{fe}}{G_{Cu}} \cdot \left(\frac{B}{j}\right)^2 \cdot 10^{-8} \quad \text{oder} \quad \text{(Gl. 25)}$$

$$\frac{G_{fe}}{G_{Cu}} = 2{,}6 \cdot \frac{p_{fe}}{p_{Cu}} \cdot \left(\frac{j}{B}\right)^2 \cdot 10^8. \quad \text{(Gl. 25a)}$$

Bei einer Induktion von 15000 Gauß, einer Stromdichte von 4 A/mm² und einem Verlustverhältnis von 1:4 muß man also 4,6 mal soviel Eisen als Kupfer in den Transformator einbauen. Legt man den Wirkungsgrad fest und damit auch die Absolutwerte der Verluste, so liegen laut den obigen Be-

ziehungen auch die Gewichte für Eisen und Kupfer fest. Man kann nun unter Wahrung der Bedingung $F \cdot q_w = \text{const.}$ Kern- und Wicklungsquerschnitt ermitteln, wobei es nur noch eine Lösung gibt, da Materialgewichte, Kernabmessungen und Spulenabmessungen auch in festen geometrischen Verhältnissen zueinander stehen, so daß nach Wahl der Materialgewichte alle Abmessungen definiert sind. Man kann nämlich unter der vereinfachenden Annahme, daß der Transformatorraum voll mit aktivem Material ausgefüllt sei, nach Abb. 54 folgende Beziehungen anschreiben (die Werte gelten pro Schenkel eines Drehstromtransformators):

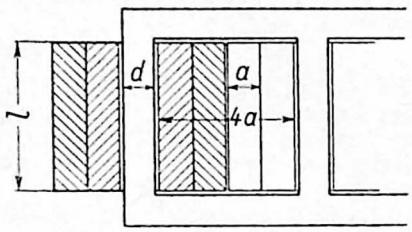



Abb. 54. Theoretische Beziehungen zwischen Abmessungen und Materialaufwand.

$$G_{Fe} = F(l + 2d + 5{,}33a) \cdot \gamma_{Fe}$$
$$G_{Cu} = 2 \cdot q_w \pi (d + 2a) \cdot \gamma_{Cu}$$
$$F = \frac{\pi}{4} d^2$$
$$q_w = a \cdot l$$
$$q_w \cdot F = \text{const.}$$

Da der Füllfaktor des Kernraumes zwischen 0,8 und 0,9 liegt (S. 64) und der des Wickelraumes je nach Spannung und Wicklungsart zwischen 0,2 und 0,5, müssen entsprechende Korrekturglieder in obige Formeln eingeführt werden.

Für die fünf Unbekannten $F$, $q_w$, $l$, $a$ und $d$ sind nach Wahl von $G_{Fe}$ und $G_{Cu}$ fünf Gleichungen vorhanden, wodurch eine Lösung möglich ist.

Legt man nur den Wirkungsgrad fest, verzichtet aber auf die Annahme des Verlustverhältnisses, so kann man den ver-

bleibenden Freiheitsgrad zur Erfüllung der Forderung nach dem billigsten Transformator verwenden. Nach einer alten Regel erhält man den billigsten Transformator dann, wenn die Wicklungskosten so groß sind wie die Kernkosten. Bei der Kostenermittlung sind natürlich nicht die Rohmaterialpreise einzusetzen, sondern die Preise für verarbeitetes Material, die je nach Kernkonstruktion, Wicklungsaufbau und Wicklungsisolation stark schwanken. Kostet z. B. für Transformatoren in einem gewissen Leistungs- und Spannungsgebiet 1 kg Wicklung dreimal so viel wie 1 kg Kern, so muß man $\frac{G_{Fe}}{G_{Cu}} = 3$ setzen. Hieraus errechnet man das Verlustverhältnis $\frac{p_{Fe}}{p_{Cu}}$. Mit den Zahlenwerten des vorigen Beispiels erhält man $\frac{p_{Fe}}{p_{Cu}} = 0{,}16$ oder $\sim 1 : 6$. Aus dem Gesamtwirkungsgrad und dem Verlustverhältnis errechnet man $p_{Fe}$ und $p_{Cu}$ und hieraus wieder $G_{Fe}$ und $G_{Cu}$, wodurch wiederum die Abmessungen festgelegt sind.

Die bisherigen Betrachtungen bezogen sich auf das aktive Material. Bei der Preisbildung spielt dies zwar die Hauptrolle, jedoch dürfen die Aufwendungen für Kessel, Öl, Kühler usw. nicht vernachlässigt werden. Für eine Verbesserung des Wirkungsgrades muß zweifellos mehr aktives Material in den Transformator eingebaut werden. Da die Verlustwärme aber hierdurch zurückgeht, kann man Ölmenge und Kesselkühlfläche verkleinern, so daß ein Teil des Mehraufwandes wieder eingespart wird. Hierdurch erklärt es sich, daß die Preiskurve als Funktion des Wirkungsgrades in der Nähe des Optimums verhältnismäßig flach verläuft.

Vergrößert man einen gegebenen Transformator storchschnabelmäßig in allen Abmessungen, so wächst das Volumen und damit das Gewicht und der Preis mit der 3. Potenz der linearen Vergrößerung. Da der Kernquerschnitt quadratisch gewachsen ist kann bei gleicher Induktion der Fluß eben-

falls quadratisch wachsen, so daß die Spannung des Transformators quadratisch steigt. Das gleiche gilt für den Strom, weil die Leiterquerschnitte ebenfalls quadratisch gewachsen sind. Die Leistung eines Transformators steigt also mit der 4. Potenz seiner linearen Vergrößerung. Sind $G_1$ und $G_2$ die Gewichte zweier miteinander zu vergleichenden Transformatoren, $N_1$ und $N_2$ deren Leistungen, so ist

$$G_2 = G_1 \sqrt[4]{\left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3}. \qquad \text{(Gl. 26)}$$

Abb. 55 zeigt die Abhängigkeit des Gewichtes von der Leistung für eine Serie von Transformatoren der Reihe 10 von 10—1000 kVA. Der 100 kVA-Transformator wurde im Gewicht mit 100% eingesetzt. Der Vergleich der tatsächlichen Gewichtskurve mit dem aus Gl. 26 ermittelten theoretischen Verlauf zeigt, daß man in Wirklichkeit nur wenig mehr Material aufwenden muß als die Theorie erwarten läßt und daß man das theoretische Wachstumsgesetz der Gl. 26 zur Umrechnung innerhalb recht weiter Grenzen verwenden kann.

Da die Leistung, wie soeben gezeigt, stärker steigt als das Gewicht eines Transformators und damit auch stärker steigt als die dem aktiven Gewicht proportionalen Verluste, steigt mit zunehmender Leistung der Wirkungsgrad, ohne daß hierfür ein relativer Mehraufwand erforderlich wird.

### 18. Rechnungsbeispiel

Zu bauen ist ein 1000 kVA-Transformator mit einem Übersetzungsverhältnis von $10000 \pm 5\%/525$ Volt in Stern/-Stern-Schaltung, voll selbstkühlend. Da der Transformator im Mittel mit Halblast fährt, sind die Verluste i. V. 1:4 auf Eisen und Kupfer aufzuteilen.

Wir wählen eine Induktion von 14550 Gauß und eine Stromdichte von $j = 3{,}7$ A/mm². Nach Gl. 25a errechnet sich ein Gewichtsverhältnis von 3,25/1 für $G_{Fe}/G_{Cu}$, wobei Blech mit $v_{10} = 1{,}3$ W/kg verwendet wird. Bei einem Preisverhältnis von 1:3 für 1 kg Kerneisen zu 1 kg Wickelkupfer, liegt der Transformator in der Nähe des Preisoptimums.

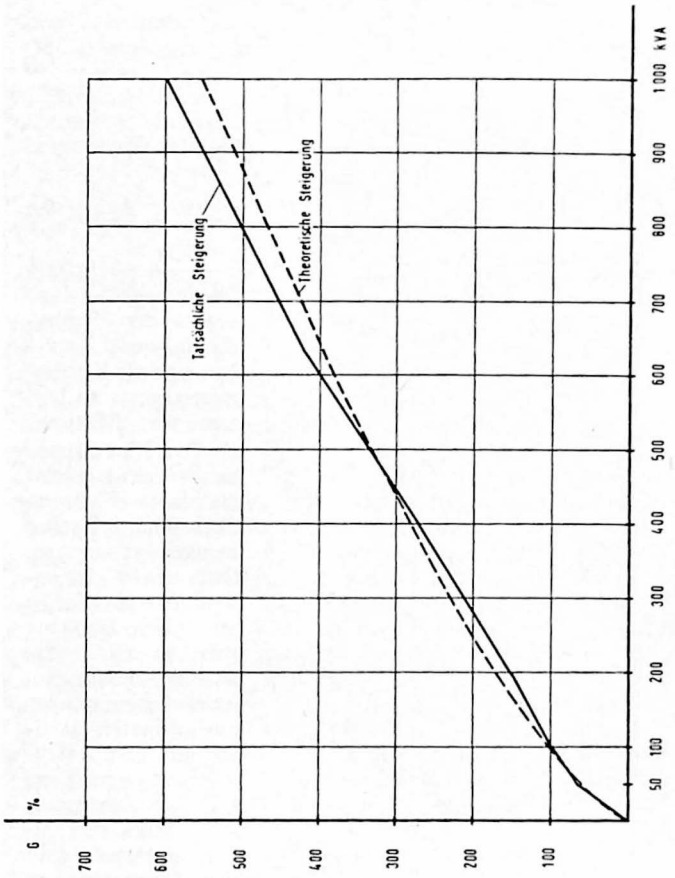



Abb. 65. Wachstumsgesetz der Transformatoren.

Auf Grund von Erfahrungen wird ein Kerndurchmesser von 250 mm gewählt, der wegen des treppenförmigen Kernaufbaues und des Verlustes durch die Blechisolation und die

Unebenheiten des Bleches einen aktiven Querschnitt von 408 cm² ergibt. Die Windungsspannung ergibt sich aus Gl. 2b zu $\frac{E_{50}}{w} = 2{,}22 \cdot 408 \cdot 14550 \cdot 10^{-6} = 13{,}18$ V. Also braucht man hochvoltseitig $\frac{10.000 \pm 5\%}{\sqrt{3} \cdot 13{,}18} = 438 \pm 22$ Windungen, niedervoltseitig $\frac{525}{\sqrt{3} \cdot 13{,}18} = 23$ Windungen. Aus den Strömen $J_1 = \frac{1000}{10\sqrt{3}} = 57{,}8$ A und $J_2 = \frac{1000}{0{,}525\sqrt{3}} = 1100$ A sowie der Stromdichte von 3,7 ergeben sich die Kupferquerschnitte zu 15,6 mm² und 298 mm².

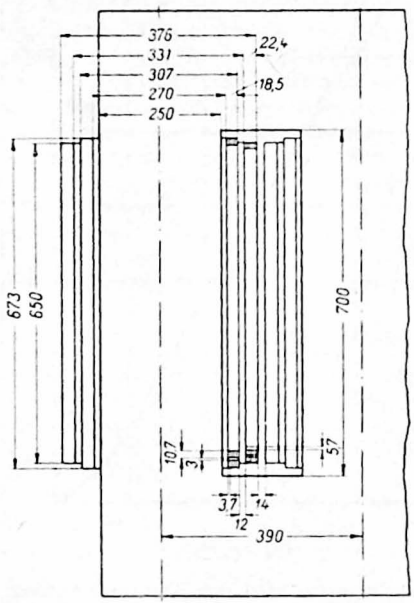



Abb. 56. Wicklungsaufbau und Abmessungen des Rechnungsbeispiels.

Die Niederspannungswicklung wird als innere Wicklung über dem Schenkel angeordnet und erhält einen Innendurchmesser von 270 mm (Abb. 56). Sie wird in zwei parallel zu schaltenden, axial übereinander angeordneten Hälften mit je 23 Windungen gewickelt. Um die Zusatzverluste klein zu halten, unterteilt man den Querschnitt in fünf parallele Drähte, die einmal verdrillt werden. Der

Drahtquerschnitt ist $3 \times 10$ mm², isoliert $3{,}7 \times 10{,}7$ mm². So erhält man als Gesamtquerschnitt $2 \times 5 \times 10 \times 3 = 300$ mm². Der radiale Platzbedarf ist $5 \times 3{,}7 = 18{,}5$ mm. Axial wird zwischen benachbarten Drähten ein Kühlkanal von 3 mm gelassen. Die Verdrillung nimmt etwa den Raum einer Leiterhöhe ein. Demnach liegen übereinander: für 23 Windungen 24mal die Leiterhöhe + Kühlkanal, dazu einmal die Leiterhöhe für die Verdrillung, gibt zusammen 336,5 mm. Da zwei Spulen übereinander angeordnet sind, ist der totale axiale Raumbedarf der Unterspannungsspule 673 mm. Die mittlere Windungslänge ist $\pi(270 + 18{,}5) = 905$ mm und demnach das Gewicht für drei Schenkel $G_{Cu_2} = 8{,}9 \cdot 23 \cdot 0{,}03 \cdot 9{,}05 \cdot 3 = 167$ kg.

Die Hochspannungswicklung wird konzentrisch über der Niederspannungswicklung angeordnet, wobei 12 mm Spalt bleiben, der zu zwei Dritteln als freie Ölstrecke, zu ein Drittel als Hartpapierzylinder ausgebildet ist. Die 460 Windungen werden auf 60 Spulen verteilt, die aus hochkant gewickeltem Draht $2{,}2 \times 7$ mm² bestehen. Der Isolationsauftrag ist 0,6 mm, so daß der Raumbedarf des Drahtes $2{,}8 \times 7{,}6$ mm² beträgt. Es werden Doppelspulen gewickelt, die einen Trennring von 0,8 mm Stärke erhalten, zwischen je zwei Doppelspulen bleibt ein Kühlkanal von 5,7 mm Höhe. Die axiale Höhe ist: $30\ (7{,}6 + 0{,}8 + 7{,}6 + 5{,}7) = 650$ mm.

Die Zahl der Windungen pro Spule liegt zwischen 7 und 8, die pro Doppelspule zwischen 15 und 16. Es werden daher Doppelspulen mit 15 und 16 Windungen gewickelt, so daß die Gesamtwindungszahl 460 wird. Der radiale Raumbedarf ist also $8 \times 2{,}8 = 22{,}4$ mm.

Für die $2 \times 22$ Windungen der Anzapfungen von $\pm 5\%$ werden an zwei Stellen der Oberspannungswicklung Ableitungen vorgesehen, so daß an diesen Stellen Windungen zu- und abgeschaltet werden können.

Die mittlere Windungslänge der Oberspannungswicklung beträgt $\pi(331 + 22{,}4) = 1110$ mm und das Gewicht für drei Schenkel $G_{Cu_1} = 8{,}9 \cdot 460 \cdot 11{,}1 \cdot 0{,}00154 \cdot 3 = 210$ kg.

Der Abstand der Oberspannungswicklung vom Unter- und Oberjoch muß aus Isolationsgründen je 25 mm betragen.

Die Schenkellänge ist also 700 mm. Nun ist nur noch der Schenkelmittenabstand festzulegen, der gleich dem äußeren Wicklungsdurchmesser plus dem Abstand zwischen den Wicklungen benachbarter Schenkel ist. Legen wir diesen mit 14 mm fest, so ist MA = 376 + 14 = 390 mm.

Nachdem nun alle geometrischen Dimensionen festliegen, lassen sich die Verluste genau ermitteln.

Ist $L$ die Schenkellänge, $MA$ der Mittenabstand und $D$ der Schenkeldurchmesser, so ist das Kerngewicht

$G_{fe} = 7{,}6 \cdot F \cdot [3L + 4MA + 2D]$ alle Werte in dm u. dm²

$G_{fe} = 7{,}6 \cdot 4{,}08\,[21 + 15{,}6 + 5{,}0] = 1290$ kg.

Die Eisenverluste betragen (siehe Gl. 7b)

$$p_{fe} = 1290 \cdot 1{,}3 \left(\frac{14550}{10000}\right)^2 = 3550 \text{ W}.$$

Bei den Kupferverlusten kontrollieren wir zuerst die Unterspannungswicklung auf ihre Zusatzverluste und stellen fest, daß dank der Unterteilung des Leiterquerschnittes und der Verdrillung die Zusatzverluste vernachlässigbar klein sind.

Nach Gl. 17 wird $p_{Cu_2} = 2{,}6 \cdot 167 \cdot 3{,}7^2 = 5950$ W, $p_{Cu_1} = 2{,}6 \cdot (210 - 5) \cdot 3{,}75^2 = 7400$ W für die Nennübersetzung. In beiden Wicklungen zusammen entstehen also 13350 W Verluste. Da in den Ableitungen zu den Klemmen noch weitere Verluste entstehen, kann man insgesamt mit 14000 W Kupferverlusten rechnen. Das Verlustverhältnis beträgt also $p_{fe}/p_{Cu} = 1/3{,}95$ und erreicht ziemlich genau das gewünschte Verhältnis von 1:4. Das Gewichtsverhältnis ist

$$\frac{G_{fe}}{G_{Cu}} = \frac{1290}{377} = 3{,}43/1.$$

Der Wirkungsgrad ist: 98,25%.

Nun errechnet man die Streuspannung nach der in Abschnitt 4 abgeleiteten Gl. 12. Die Schenkelleistung ist $333{,}3 \cdot 10^3$ W, der reduzierte Luftspalt $\delta' = 2{,}6$ cm, der Umfang des Streukanals $l_u = 101$ cm und die Länge des Streuwegs $l_s = 66{,}7$ cm. Damit ergibt sich $u_s\% = 2{,}98$.

Der prozentuale Ohmsche Spannungsfall ist

$$u_r = \frac{p_{Cu}}{N} 100 = \frac{14}{1000} \cdot 100 = 1{,}4\%.$$

Die Kurzschlußspannung wird dann:

$$u_k = \sqrt{2{,}98^2 + 1{,}4^2} = 3{,}29\%.$$

Hiermit sind die wichtigsten Daten festgestellt.

Bei Verwendung kornorientierter Bleche können Material-Gewichte und Verluste beträchtlich gesenkt werden.

## III. Der Transformator im Betrieb

### 19. Schaltung und Parallellauf

Die Wicklungen der drei Schenkel eines Drehstromtransformators lassen sich in verschiedener Weise miteinander ver-

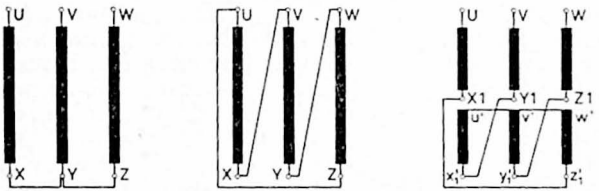



Abb. 57. Stern-, Dreieck- und Zickzack-Schaltung.

binden. Je nachdem erhält man die Stern-, Dreieck- oder Zickzackschaltung, Abb. 57.

Die Sternschaltung hat den Vorteil, daß sie den Netznullpunkt bildet, der zum Anschluß eines Nulleiters im Drehstromverteilungsnetz oder zum Anschluß von Erdschlußspulen gebraucht wird. Eine volle Belastbarkeit dieses Nullpunktes ist allerdings erst dann möglich, wenn der Transformator außer der Stern- auch noch eine Dreieckwicklung besitzt, die den in den Nullpunkt der Sternwicklung eintretenden Strom ohne Drosselung — von der kleinen Streuung abgesehen — entweder auf zwei Phasen des speisenden Netzes verteilt oder durch Bildung eines Ausgleichstromes innerhalb der Dreieckwicklung auf die drei Phasen des Sternsystems verteilt, Abb. 26.

Die Dreieckschaltung hat gegenüber der Sternschaltung folgenden Nachteil: sie muß auf jedem Schenkel statt der Phasen- die verkettete Spannung erzeugen, hat also 73% mehr Windungen mit einem im gleichen Verhältnis geringeren Querschnitt. Sie erfordert also einen größeren Aufwand an Isoliermaterial, d. h. der Wickelraum kann schlechter als bei der Sternwicklung mit aktivem Material angefüllt werden. Die Dreieckschaltung wird deshalb bei hohen Spannungen, weil zu teuer, gemieden. Schließlich ist die Dreieckwicklung auch überspannungstechnisch ungünstiger als die Sternwicklung, weil die Überspannungswellen vom Netz aus in beide Enden der Wicklungen eintreten können. Man baut Großtransformatoren mit beiderseits hohen Spannungen — 100/60 kV oder 60/30 kV z. B. — in Stern-Stern-Schaltung und versieht sie, wenn Belastbarkeit des Nullpunktes gefordert wird, mit einer Tertiärwicklung, die in Dreieck geschaltet und für kleine Spannung, etwa 6 oder 10 kV ausgelegt, als Ausgleichswicklung dient; im allgemeinen wird ein Eckpunkt des Dreiecks geöffnet an zwei Klemmen über Deckel geführt, so daß eine Messung des Ausgleichstromes möglich ist.

Ein Vorteil der Dreieckschaltung liegt darin, daß in ihr die Ströme dreizahliger Frequenz als Kreisströme fließen können, die der Transformator zur Bildung eines sin-förmigen Flusses braucht und die im Drehstromsystem wegen ihrer Gleichphasigkeit in den drei Leitern nur fließen könnten, wenn der Generatoren-Nullpunkt mit dem Nullpunkt des Transformators verbunden würde (vgl. auch Abschn. 3 u. 10).

Die Zickzackschaltung bildet die Strangspannung aus zwei von benachbarten Schenkeln herrührenden Teilspannungen. Da sich diese unter einem Winkel von 120° zusammensetzen, und nicht arithmetisch, braucht man im Vergleich zur Sternschaltung $\frac{2}{\sqrt{3}} = 1{,}155$, also 15,5% mehr Wicklungsmaterial. Dafür läßt die Zickzackschaltung aber ohne weitere Dreieckwicklung volle Belastung des Nullpunktes zu, da der im Nullpunkt eintretende Strom ja auf zwei

Schenkel verteilt wird und so zwangloses AW-Gleichgewicht auf jedem Schenkel ermöglicht.

In der Praxis haben sich für die verschiedenen Transformatorengruppen folgende Schaltarten als technisch und wirtschaftlich zweckmäßig herausgestellt:

Netztransformatoren bis 30 kV Oberspannung und bis 400 kVA und 400 V Unterspannung Stern-Zickzack
Netztransformatoren bis 30 kV, > 400 kVA, 400 V Unterspannung ..... Dreieck-Stern
Netztransformatoren mit höherer Unterspannung oder unbelastetem Nullpunkt.. Stern-Stern
Maschinentransformatoren ..... Stern-Dreieck
Netzkupplungstransformatoren ..... Stern-Stern, meist mit Tertiärwicklung.

Die erste Bezeichnung gilt für die Oberspannungs-, die zweite für die Unterspannungsseite.

Die verschiedenen Schaltungskombinationen sind vom VDE zu vier Gruppen zusammengefaßt (Abb. 58).

Schaltgruppe A überträgt die Spannung mit unveränderter Phasenlage.
„ B dreht um 180°.
„ C dreht um 150° rückwärts.
„ D dreht um 30° vorwärts.

Sinnfälliger als die obengenannten Bezeichnungen der Schaltgruppen sind die IEC-Bezeichnungen gemäß folgender Tabelle:

| Schaltungsart | Oberspannungsseite | Unterspannungsseite |
|---|---|---|
| Dreieck | *D* | *d* |
| Stern | *Y* | *y* |
| Zickzack | *Z* | *z* |

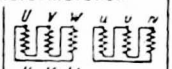
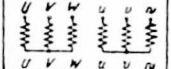
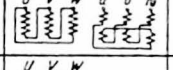
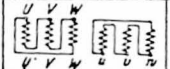
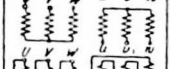
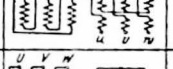
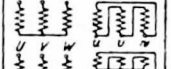
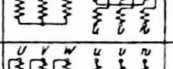
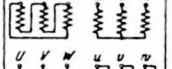
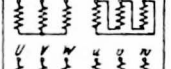
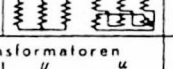
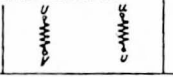
Der Phasenwinkel wird durch einen Index entsprechend dem Zifferblatt der Uhr angegeben. Die Schaltgruppe A erhält demnach den Index 0, die Schaltgruppe B den Index 6, die Schaltgruppe C den Index 5 und die Gruppe D den Index 11.

Man schreibt also z. B. an Stelle von C2 = Yd5, woraus sofort abzulesen ist, daß der Transformator oberspannungsseitig in Stern, unterspannungsseitig in Dreieck geschaltet ist und die Spannung um 150 nach rückwärts gedreht wird.

Parallellauf von Transformatoren der gleichen Schaltgruppe, z. B. $A_2$ mit $A_3$, ist möglich. Parallellauf zwischen $A$ und $B$ bzw. $C$ und $D$ nur dann, wenn bei einem Transformator auf einer Seite die Phasenanfänge mit den Phasenenden vertauscht werden, zum Ausgleich der 180° Phasendrehung, die zwischen $A$ und $B$ bzw. $C$ und $D$ liegen. Parallellauf zwischen $C$ und $D$ kann auch erreicht werden durch Vertauschen je zweier Phasen auf der Ober- und Unterspannungsseite, z. B. $U$ mit $V$ und $v$ mit $w$.

Selbstverständliche weitere Voraussetzung für einwandfreien Parallellauf ist gleiches Übersetzungsverhältnis. Unterschiede im Übersetzungsverhältnis führen zur Ausbildung von Kreisströmen dadurch, daß die Differenzspannung als EMK auf einen Stromkreis wirkt, der durch die beiden parallel geschalteten Transformatoren gebildet wird und in dem als einzige Impedanzen die Kurzschlußimpedanzen der beiden Transformatoren in Reihe liegen. 5% Unterschied im Übersetzungsverhältnis würde z. B. schon zu einer nutzlosen Vorbelastung von 62,5%, bezogen auf die Leistung eines der gleich groß angenommenen Transformatoren führen, wenn ihre Kurzschlußspannung 4% beträgt.

Zur richtigen Aufteilung der Belastung auf parallel laufende Transformatoren ist schließlich noch notwendig, daß ihre Kurzschlußspannungen gleich groß sind und sich aus gleichen Komponenten von induktiven bzw. Ohmschen Spannungsabfällen zusammensetzen. Sind die Kurzschlußspannungen verschieden groß, so wird der Transformator kleinerer Kurzschlußspannung überlastet. Sind die Kurzschlußspannungen in den parallel laufenden Transformatoren nicht gleichphasig, so bilden sich wiederum nutzlose Kreisströme, die Gleichphasigkeit der Spannungsabfälle erzwingen. Häufig werden, um einwandfreien Parallellauf zu ermöglichen, vor den Transformator kleinerer Kurzschlußspannung Drosselspulen zum Ausgleich geschaltet.

| I | II | III | IV | V |
|---|---|---|---|---|
| VDE-Bezeichnung | | Vektorbild Ober- Unter- spannung | Schaltungsbild Ober- Unter- spannung | IEC-Bezeichnung der Schaltungen |
| Schaltgruppe | Schaltung | | | |
| | I. Dreiphasen-Transformatoren | | | |
| A | A 1 | |  | Dd0 |
| | A 2 | |  | Yy0 |
| | A 3 | |  | Dz0 |
| B | B 1 | |  | Dd6 |
| | B 2 | |  | Yy6 |
| | B 3 | |  | Dz6 |
| C | C 1 | | | Dy5 |
| | C 2 | |  | Yd5 |
| | C 3 | |  | Yz5 |
| D | D 1 | |  | Dy11 |
| | D 2 | |  | Yd11 |
| | D 3 | |  | Yz11 |
| | II. Einphasen-Transformatoren | | | |
| E | — | |  | — |

Der Schaltsinn ist so, daß der Wickelsinn, von gleichbezeichneten Klemmen ausgegangen, gleichsinnig ist.

Abb. 58. Die Schaltgruppen der Drehstrom-Transformatoren.

Die VDE-Regeln lassen Parallellauf zu, wenn die Kurzschlußspannungen nicht mehr als ± 10% voneinander abweichen, und empfehlen den Parallellauf nur für Transformatoren, die keine größeren Leistungsunterschiede als 1 : 3 besitzen.

### 20. Ein- und Ausschaltvorgänge

Beim Ein- und Ausschalten von Transformatoren können Ausgleichsvorgänge in Strom und Spannung auftreten, die wegen ihrer Rückwirkungen auf das Netz und den Transformator untersucht werden sollen.

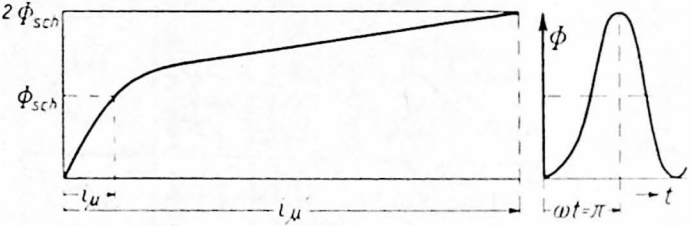



Abb. 59. Ermittlung des Einschalt-Magnetisierungsstromes.

Im Abschnitt 2 ist gezeigt worden, daß Spannung und Fluß bzw. Magnetisierungsstrom im Transformator um 90° phasenverschoben sind. Schließen die Kontakte des Schalters beim Einschalten eines spannungslosen Transformators im Spannungsmaximum, so muß der Fluß im Transformator Null sein, ebenso der Magnetisierungsstrom, was ja auch zutrifft. Mit der nach dem sin-Gesetz fallenden Spannung wächst dann der Fluß von Null ebenfalls sin-förmig und der Transformator nimmt einen, dem jeweiligen Zeitwert des Flusses entsprechenden Magnetisierungsstrom auf. Die Einschaltung ist zwanglos vor sich gegangen.

Anders liegen die Verhältnisse, wenn die Kontakte bei Spannung Null schließen. Hier müßte der Fluß sein Maximum haben, besitzt aber im spannungslosen Transformator noch den Wert Null. Es herrscht ein dem stationären wider-

sprechender Zustand, der durch einen Ausgleichvorgang überbrückt werden muß. Fluß und Spannung hängen, wenn der Ohmsche Widerstand vernachlässigt wird und die Dimensions-Konstanten weggelassen werden, zusammen entsprechend der Beziehung

$$u = w \frac{d\Phi}{dt} = U \cdot \sin \omega t.$$

Die Integration ergibt:

$$\Phi = -\frac{U}{w \cdot \omega} \cos \omega t + C$$
$$= -\Phi_{sch} \cos \omega t + C.$$

Aus der Einschaltbedingung, daß $\Phi = 0$ ist für $t = 0$, ergibt sich die Integrationskonstante zu $C = \Phi_{sch}$, es wird also $\Phi = \Phi_{sch} - \Phi_{sch} \cos \omega t$. Dem normalen Wechselfluß $\Phi_{sch} \cos \omega t$ hat sich ein Gleichfluß ($C = \Phi_{sch}$) von der Größe des Scheitelwertes des Wechselflußes überlagert. Nach einer Halbperiode ($\omega t = \pi$) wird demnach der Augenblickswert des Flusses $\Phi = 2\Phi_{sch}$, er erreicht den doppelten Scheitelwert des stationären Zustandes. Den zum resultierenden Fluß gehörigen Magnetisierungsstrom entnimmt man der Magnetisierungskennlinie. Er erreicht ein hohes Vielfaches des normalen Magnetisierungsstromes (Abb. 59). Noch ungünstiger werden die Verhältnisse, wenn der Eisenkern im Augenblick der Einschaltung einen Remanenzfluß $\Phi_{rem}$ besitzt, der sich zu $2\Phi_{sch}$ addiert (Abb. 60) und den Scheitelwert

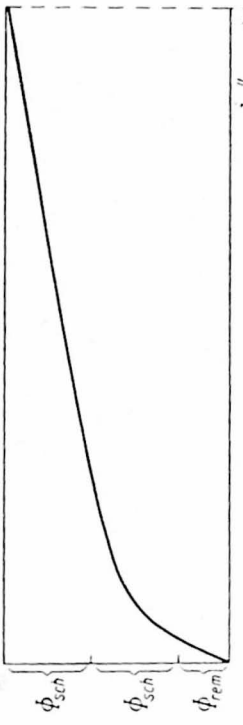



Abb. 60. Einschaltstrom bei vorhandenem Remanenzfluß.

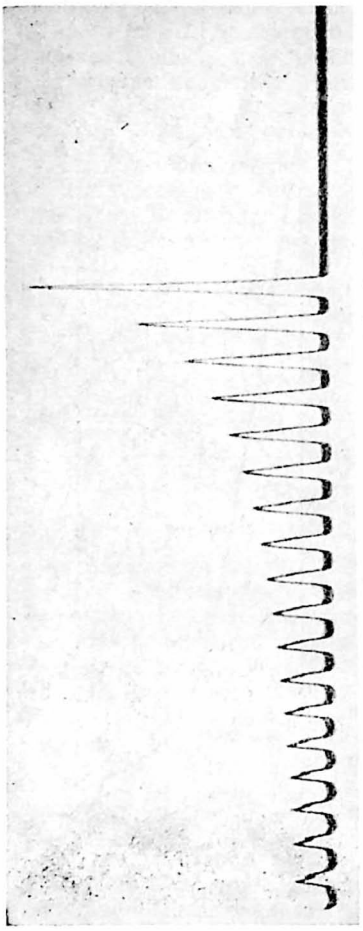



Abb. 61. Oszillogramm des Einschaltstromes eines Transformators (Leerlaufstrom durch Oberwellen verzerrt).

des Magnetisierungsstromes abermals erhöht. Gemildert wird der Einschaltstromstoß durch die Ohmschen Widerstände $R$ der Wicklung und den Spannungsabfall des Magnetisierungsstromes an der Streuinduktivität $L_s$ der Primärwicklung. Das Gleichstromglied klingt dank des Widerstandes $R$ nach einer Exponentialfunktion rasch ab und das Gesamtfeld erreicht schon nach einer Halbperiode gar nicht mehr den Wert $2\Phi_{sch}$, sondern z. B. für ein Dämpfungsverhältnis $\frac{R}{L_0} = 0{,}05$, worin $L_0$ die Leerlaufinduktivität des Transformators bedeutet, nur noch den 1,86 fachen Wert von $\Phi_{sch}$. Das Gleichstromglied ist nach einigen Halbperioden ganz verschwunden (Abb. 61), womit der Ausgleichvorgang beendet ist. Das Streufeld mit seinem, dem Strom proportionalen

Wert wirkt ebenfalls entlastend, weil es als Teil des Gesamtflusses den auf das Eisen entfallenden Teil des Flusses verkleinert. Trotzdem erreicht der Magnetisierungsstromstoß unter ungünstigen Verhältnissen noch den 60—80fachen Wert des normalen Magnetisierungsstromes, übersteigt also u. U. sogar den Normalstrom des Transformators noch beträchtlich. Je höher die Sättigung des Eisenkernes gewählt ist, desto größere Stromstöße sind zu erwarten.

Die früher zur Verkleinerung des Einschaltstoßes üblichen Schalter mit Vorstufenwiderständen, die beim Einschalten kurzzeitig einen Widerstand zwischen Netz und Transformator legten, hat man heute wegen ihres komplizierten Aufbaues vollkommen verlassen. Da der Einschaltvorgang in wenigen Perioden abgeklungen ist, nimmt man den Stromstoß, der weder dem Netz noch dem Transformator Schaden zufügen kann, in Kauf und stellt Relais und Sicherungen so ein, daß sie den allenfalls auftretenden Einschaltstromstoß ohne anzusprechen vertragen. Überdies wird der ungünstigste Schaltmoment, nämlich Schließung des Stromkreises bei Spannung Null, selten erreicht, weil meist kurz vor Berührung der Kontakte der Stromkreis durch Überschlag der restlichen kleinen Schaltstrecke in der Nähe des Spannungsmaximums geschlossen wird.

Bisher war von der Einschaltung des leerlaufenden Transformators die Rede. Der zweite Grenzfall ist die Einschaltung des sekundärseitig kurzgeschlossenen Transformators. Der hierbei auftretende Dauer-Kurzschlußstrom wurde in Abschnitt 8 zu $J_k = J_n \frac{100}{u_k}$ ermittelt. Im Augenblick der Einschaltung können aber, ähnlich wie beim leerlaufenden, auch beim kurzgeschlossenen Transformator Ausgleichvorgänge auftreten, die zu einer zeitweisen Vergrößerung von $J_k$ führen. Wirksam sind im kurzgeschlossenen Transformator die Ohmschen Widerstände $R$ und die Streuinduktivität $L_s$. Die an ihnen auftretenden Spannungsabfälle müssen in jedem Zeitpunkt der angelegten EMK das Gleichgewicht halten. Hiernach muß der Ansatz lauten:

$$L_s \frac{di}{dt} + i \cdot R = e = E_{sch} \cdot \sin \omega t.$$

Die Lösung dieser Differentialgleichung lautet:

$$i = \frac{E_{sch}}{\sqrt{R^2 + (\omega L_s)^2}} \cdot \sin(\omega t - \varphi) + K \cdot e^{-\frac{R}{L_s} \cdot t},$$

wobei $\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L_s}{R}$ und $K = \frac{E_{sch}}{\sqrt{R^2 + (\omega L_s)^2}} \cdot \sin \varphi$.

Da $\frac{E_{sch}}{\sqrt{R^2 + (\omega L_s)^2}} = J_K \cdot \sqrt{2}$, kann man schreiben:

$$i = J_K \sqrt{2} \left[\sin(\omega t - \varphi) + \sin \varphi \cdot e^{-\frac{R}{L_s} \cdot t}\right].$$

Der bei Schaltung auf Kurzschluß auftretende Strom besteht also aus einem Wechselstromglied ($J_k \sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi)$, das den Dauerkurzschlußstrom darstellt, und einem nach einer Exponentialfunktion abklingenden Gleichstromglied $J_k \sqrt{2} \sin \varphi \cdot e^{-\frac{R}{L_s} \cdot t}$. Zur Zeit $t = 0$ wird $i = 0$. Für den ungedämpften Kreis ($R = 0$) würde $\varphi = 90^0$, demnach $i' = J_K \sqrt{2} [\sin(\omega t - 90) + 1]$, was für $\omega t = \pi$ ($= 180^0$), also nach einer Halbperiode nach der Einschaltung $i = 2 J_K \sqrt{2}$ ergibt.

Die höchste Stromspitze, die bei Einschaltung eines ungedämpften, also widerstandsfreien kurzgeschlossenen Transformators auftreten kann, ist der doppelte Scheitelwert des Dauerkurzschlußstromes $J_K$. Sie tritt nur auf, wenn die Einschaltung bei Spannungsnulldurchgang erfolgt, was im Ansatz dadurch ausgedrückt war, daß $e = E_{sch} \cdot \sin \omega t$ gesetzt war, also für $t = 0$, d. h. den Einschaltaugenblick $e = 0$. Schaltet man im Spannungsmaximum, so tritt kein Gleichstromglied auf, der Stromkreis schwingt ohne Ausgleichvorgang in den Dauerzustand ein ($i = J_K \cdot \sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi)$).

Die stets vorhandene Dämpfung bewirkt, daß die höchste Stromspitze auch bei Schaltung im Spannungsminimum nur etwa $1{,}8\, J_K/\sqrt{2}$ statt $2\, J_K/\sqrt{2}$ wird.

Ist der Transformator vor dem Zuschalten schon auf der Sekundärseite an Verbraucher angeschlossen, so überlagern sich beim Einschalten zwei Vorgänge: Der Magnetisierungsstromstoß und der Ausgleichvorgang, der ähnlich wie bei Schaltung auf Kurzschluß bei der Einschaltung der Verbraucher eintritt, die ja im allgemeinen auch teilweise induktiven Charakter haben. Aber selbst bei rein Ohmschen Verbrauchern würde ein Ausgleichvorgang festzustellen sein, weil die Streuinduktivität des Transformators im eingeschalteten Kreis liegt. Interessant ist, daß bei belasteter Sekundärseite auch der Magnetisierungsstromstoß selbst beeinflußt wird. Die Gleichstromkomponente verteilt sich nämlich jetzt auf Primär- und Sekundärseite des Transformators, wodurch der auf der Primärseite auftretende Stoß kleiner wird. Andererseits verlängert sich aber die Abklingzeit, weil infolge der Verteilung des Stromes die Dämpfung sinkt, das Sekundärkupfer ist gewissermaßen für den Ausgleichstrom dem Primärkupfer parallel geschaltet. Liegen auf der Sekundärseite des Transformators Kapazitäten, also Kabel oder lange Freileitungen, so verringern diese durch Lieferung von Blindstrom ebenfalls den Stoßstrom der Primärseite.

Auch bei der Abschaltung leerlaufender Transformatoren können anomale Vorgänge auftreten. Unterbricht der Leistungsschalter den Magnetisierungsstrom nicht bei einem natürlichen Nulldurchgang, sondern würgt ihn bei einem endlichen Wert ab, so ist im Augenblick der Stromunterbrechung noch magnetische Energie im Transformator aufgespeichert. Ist der Zeitwert des Magnetisierungsstromes, bei dem die Unterbrechung vor sich geht, $i$ und die Leerlaufinduktivität $L_0$ — diese ist bei gesättigtem Eisenkern eigentlich keine Konstante, sondern hängt von der Größe des Zeitwertes $i$ ab, es ist aber für diese Betrachtung zulässig, $L_0$ aus den Effektivwerten von Spannung und Leerlaufstrom zu er-

rechnen —, so ist die magnetische Energie

$$A_m = {}^1/_2\, i^2\, L_0\ [\mathrm{Ws}]. \qquad \text{(Gl. 27)}$$

Da diese Energie wegen der offenen Schalterkontakte nicht zum Generator zurückschwingen kann, muß sie sich auf einem anderen Weg ausgleichen. Abb. 62 zeigt das Ersatzschaltbild des abgeschalteten Transformators. $C$ ist die Kapazität, die auch nach der Abschaltung noch zwischen den Phasen verbleibt, es sind Verbindungskabel oder -schienen zwischen Transformator und Schalter, welche die Kapazität bilden.

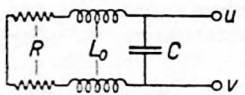



Abb. 62. Ersatzschaltbild des abgeschalteten Transformators.

In dem Schwingungskreis, der von $L_0$ und $C$ gebildet wird, schwingt die Energie so lange, bis sie in den Verlustwiderständen verzehrt ist. Die Energie wandelt sich bei jeder Schwingung von magnetischer, die ihren Sitz im Eisenkern, in elektrische Energie, welche ihren Sitz in der Kapazität hat, und wieder zurück in magnetische usf. Die von der Kapazität gespeicherte Energie ist

$$A_e = {}^1/_2\, e^2 C\ [\mathrm{Ws}], \qquad \text{(Gl. 27a)}$$

wenn $e$ die an der Kapazität auftretende Spannung ist. $A_m$ und $A_e$ müssen gleich sein, da, von den Verlustwiderständen abgesehen, kein anderer Energiespeicher vorhanden ist. Demnach errechnet sich die Spannung an der Kapazität zu

$$e = i \sqrt{\frac{L_0}{C}}.$$

Da die Kapazität meist klein ist, können beträchtliche Spannungen zwischen den Klemmen von Transformatoren auftreten, die in einem ungünstigen Augenblick abgeschaltet werden. Für einen 20 MVA-Transformator 100/30 kV errechnet sich z. B. eine Überspannung vom 4,4fachen Wert im ungünstigsten Falle, wobei sogar ein langes Verbindungskabel zwischen Transformator und Schalter, also große Kapazität, angenommen ist. Glücklicherweise ist die Energie, die hinter dieser Überspannung steht, sehr gering, im obigen Falle z. B.

nur 1000 Ws, so daß bei Überschlägen außerhalb des Transformators keine nennenswerten Zerstörungen hervorgerufen werden können. Außerdem kann dem Überschlag kein Betriebsstrom folgen, da der Transformator ja nun vom Netz getrennt ist. Die Verhältnisse werden durch die Unterbrechungsvorgänge im Schalter selbst stark beeinflußt und bei sinnvoller Schalterkonstruktion im wesentlichen gemildert. Trotzdem hat man bei unzweckmäßig gebauten Schaltern Ausschaltüberspannungen vom 6fachen Wert der Normalspannung gemessen. Durch Einbau von Überspannungsableitern können die Abschaltüberspannungen auf ein ungefährliches Maß herabgesetzt werden. Dabei ist es gleichgültig, zu welcher Wicklung des Transformators die Ableiter parallel gelegt werden; aus wirtschaftlichen Gründen wird man zum Anschluß die Wicklung mit der niedrigsten Spannung wählen.

### 21. Überspannungsbeanspruchung

Der Transformator hat nicht nur seine Betriebsspannung bei gelegentlicher Erhöhung um 10 oder 20% anstandslos auszuhalten, sondern er muß auch Überspannungen, die durch Schalthandlungen im Netz ausgelöst werden, vor allem aber atmosphärischen Überspannungen gewachsen sein. Mindestens sollte er so gebaut sein, daß bei unerträglich hohen Überspannungen der Überschlag über und nicht unter Deckel eintritt.

Erleichtert wird die Erfüllung dieses Wunsches dadurch, daß das Öl gegenüber der Luft dem Durchschlag eine erhöhte Verzögerung entgegensetzt, daß also eine Isolation des Transformators unter Öl, die bei Prüfung mit normaler Frequenz bei kleinerer Spannung durchschlagen würde als die Isolation über Deckel, bei Stoßbeanspruchung der Außenisolation dennoch beträchtlich überlegen ist, Abb. 63. Bei Zeiten $< 10^{-6}$ [s] überschneiden sich die Kurven wieder. Direkte Blitzschläge können also zu Innenüberschlägen führen.

Atmosphärische Überspannungen, sogen. Stoßüberspannungen, beanspruchen die Transformatoren grundsätzlich andersartig als die Betriebsspannung, so daß eine einfache

Verstärkung der Isolation nicht der sinnvollste Weg ist, den Transformator stoßfest zu machen.

Abb. 64 zeigt das Ersatzschaltbild des Transformators, wie es bei Überspannungs-Betrachtungen gebraucht werden kann. Die Wicklung ist aufgelöst in Elemente, die Induktivität sowie Kapazität gegen das Nachbarelement und gegen Erde besitzen. Trifft auf ein solches Gebilde eine Überspan-

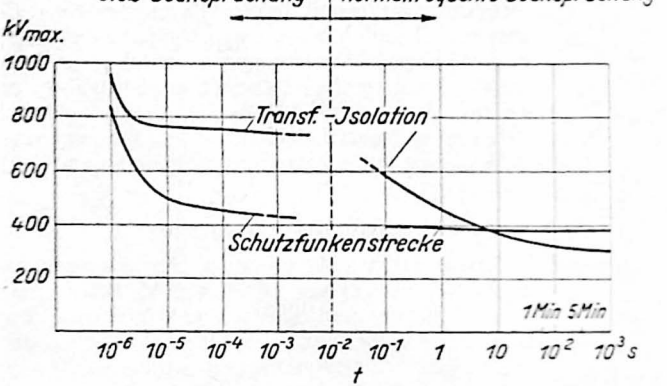



Abb. 63. Innere und äußere Festigkeit eines Transformators bei Stoßbeanspruchung und normalfrequenter Beanspruchung.

nungswelle mit steiler Front, so kann wegen der großen Steilheit der Stirn in die Induktivität zunächst kein Strom einziehen (große Gegen-EMK, weil $\frac{di}{dt}$ sehr groß). Die Spannungsverteilung erfolgt so, als ob nur die Kapazitäten vorhanden wären, also wie bei einem Kettenleiter, d. h. auf die ersten Glieder der Kette entfällt ein großer Teil der Spannung, auf die weiteren ein immer kleinerer Teil.

Die Aufladung der Kapazitäten erfolgt aus der Energie der Wanderwellen. Läuft die Wanderwelle am Transformator vorbei, so wird durch diesen Energie entnommen, ihre Stirnsteilheit verringert; die Kapazitäten werden jedoch bis zum Schei-

telwert der Wanderwelle aufgeladen. Ungünstiger liegt der Fall, wenn der Transformator die Leitung abschließt. Dann wird, wenn die Aufladung der Transformatoren bis zum Scheitelwert

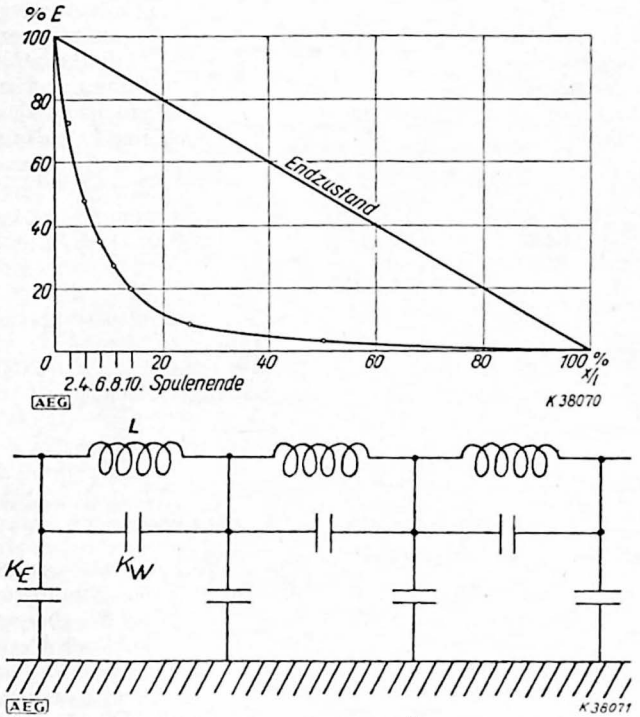



Abb. 61. Ersatzschaltbild des Transformators für Überspannungsvorgänge und Spannungsverteilung bei Stoß.

der ankommenden Welle erfolgt ist, eine Reflexion wie am Endpunkt einer offenen Leitung erfolgen und die Spannung kann theoretisch bis zum doppelten Wert der anlaufenden Welle ansteigen. Voraussetzung hierfür ist, daß die Energie der Wander-

welle genügend groß ist, daß die Kapazität des Transformators aus ihr aufgeladen werden kann, was praktisch immer zutrifft.

Die Hauptisolationen der Wicklung, d. i. die Isolation gegen Kern, Konstruktionsteile und Niedervoltwicklung, wird also bei Beginn des Stoßes am Wicklungseingang am stärksten beansprucht. Für die innere Isolation, die Isolation zwischen Windungen und Spulen, gilt, daß die Windungen am Wicklungseingang außerordentlich hoch beansprucht werden, während auf den Rest der Wicklung nur noch eine verhältnis-

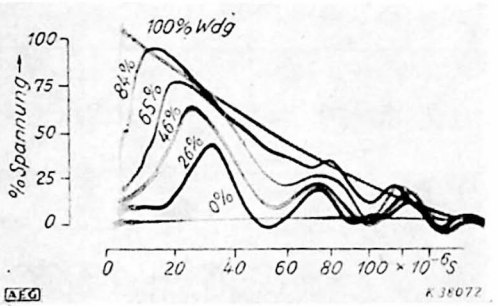



Abb. 65. Kathodenstrahl-Oszillogramm des Spannungsverlaufes an verschiedenen Punkten der Wicklung bei Stoßbeanspruchung.

mäßig kleine Spannung entfällt. 85% der Spannung werden für eine bestimmte Wicklung z. B. an 20% der Windungen abgebaut, für die restlichen 15% stehen 80% der Windungen zur Verfügung. Doch dies gilt nur für den ersten Augenblick. Der Endzustand für die vom Strom der Stoßwelle durchflossene Wicklung ist eine lineare Verteilung der Spannung vom Wicklungsanfang bis zum Wicklungsende (Abb. 64 oben, gilt für geerdeten Sternpunkt), so daß also die innere Isolation längs der ganzen Wicklung völlig gleichmäßig belastet ist. Der Übergang vom Anfangs- in den Endzustand erfolgt nun nicht aperiodisch, sondern schwingend, dank der Teilkapazitäten und Induktivitäten der Wicklung. Abb. 65 zeigt diese Schwingungen im Kathodenstrahloszillogramm. Es ist hier der zeitliche

Verlauf der Spannung für verschiedene Punkte der Wicklung aufgenommen. An Schnittlinien parallel zur Ordinatenachse kann man ablesen, wie groß für einen bestimmten Zeitpunkt die Potentialdifferenz zwischen den verschiedenen Punkten der Wicklung ist. Man erkennt leicht, daß große Spannungsunterschiede zu verschiedenen Zeitpunkten zwischen verschiedenen Teilen der Wicklung herrschen, daß also die Isolation zwischen Windung und Windung und Spule und Spule nur im ersten Augenblick am Wicklungsanfang am größten war, im weiteren Verlauf des Vorganges tritt die Hauptbeanspruchung an anderen Stellen auf, der Punkt stärkster Beanspruchung wandert durch die Wicklung und man muß die ganze Windungsisolation stark machen, um vor Zufälligkeiten geschützt zu sein, wenn man nicht die nachstehend beschriebene schwingungsfreie Anordnung der Wicklung wählt. Auch die Hauptisolation wird während des Schwingungsvorganges an verschiedenen Punkten im Innern der Wicklung fast so stark wie an der Klemme belastet.

Die vorstehenden Bilder gelten für geerdeten Sternpunkt. Bei isoliertem Sternpunkt spielen sich die Vorgänge ähnlich ab, hier muß jedoch ein Unterschied zwischen einpoligem und dreipoligem Stoß gemacht werden. Bei einpoligem Stoß verteilt sich die Spannung von der gestoßenen Klemme über den Nullpunkt hinweg bis zu den beiden nicht gestoßenen Klemmen, die man über den Wellenwiderstand der angeschlossenen Leitung als geerdet betrachten kann. Der Nullpunkt nimmt also hierbei eine Spannung an und er kann beim Ausgleichsvorgang über die Spannung der Anfangsverteilung hinaus schwingen. Besonders ungünstig werden die Verhältnisse beim dreipoligen Stoß, weil hier in alle drei Phasen gleichzeitig die Energie der Wanderwelle eintritt und die sich in den Wicklungen ausbildenden stehenden Wellen das Potential des Nullpunktes erheblich über das Potential der einlaufenden Welle hinaus erhöhen können. Bei isoliertem Nullpunkt ist also für die Isolation der Wicklung gegen Erde die Stoßbeanspruchung im Nullpunkt gefährlicher als an der Klemme.

Wenn es gelingt, schon die Anfangsverteilung der Spannung linear zu gestalten, fällt der Ausgleichsvorgang zwischen

krummliniger Anfangs- und geradliniger Endverteilung fort und damit auch die gefährlichen Überbeanspruchungen der

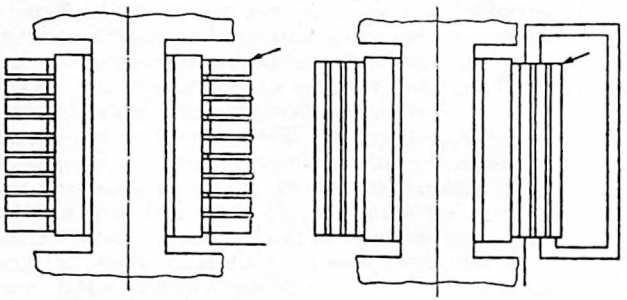



Abb. 66. Schema von Spulen- (a) und Lagenwicklung (b).

Windungsisolation, man hätte eine schwingungsfreie Wicklung. Ursache der ungleichmäßigen Anfangsverteilung sind

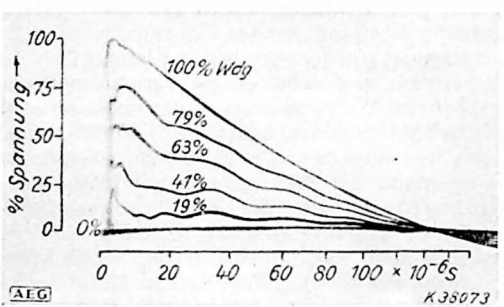



Abb. 67. Kathodenstrahl-Oszilliogramm einer schwingungsfreien Wicklung. Verlauf der Spannung an verschiedenen Punkten der Wicklung bei Stoßbeanspruchung.

die verteilten Erdkapazitäten, deren Ladeströme vom Wicklungsanfang über die Windungskapazitäten geführt werden

müssen. Eine lagenförmig angeordnete Wicklung (Abb. 66b) hat im Gegensatz zur normalen Spulenwicklung (Abb. 66a) fast nur in der innersten Lage d. h. in der Nähe des Nullpunktes eine Kapazität gegen Erde, läßt also Schwingungsfreiheit vermuten. Der Vergleich zwischen den Oszillogrammen der Abb. 65 und 67 zeigt, daß durch die einfache Methode der Lagenwicklung tatsächlich Schwingungsfreiheit erreicht wird.

### 22. Schutzeinrichtungen

Zum Schutz von Transformatoren hat sich ganz allgemein das Buchholzrelais eingeführt, das an Empfindlichkeit und Einfachheit des Aufbaues schwer von einer anderen Schutzeinrichtung übertroffen werden kann. Seine Wirkungsweise ist auf der Tatsache aufgebaut, daß im Entstehen begriffene Fehler im Transformator, sei es Eisenbrand, Windungs- oder Erdschluß, immer eine lokale Erhitzung und als deren Folge Bildung von gasförmigen Zersetzungsprodukten mit sich bringen, daß ferner bei schweren Fehlern plötzlich eine erhebliche Menge Öl verdampft, wodurch eine Öldruckwelle entsteht, die Öl in kräftigem Strom vom Transformatorkessel zum Ausdehnungsgefäß treibt. Das Buchholzrelais besteht demgemäß aus einem in die Rohrleitung Transformator-Ausdehnungsgefäß eingebauten Gefäß, in dem sich zwei mit Kontakten versehene Schwimmer befinden (Abb. 68). In dem Relais sammelt sich das bei schleichenden Fehlern entstehende Gas, und wenn genügend Öl im Relais verdrängt ist, sinkt der obere Schwimmer und schließt seinen Kontakt, der ein Warnsignal auslöst. Der zweite, untere Schwimmer ist so angebracht, daß er durch einen starken Ölstrom zum Ausdehnungsgefäß gekippt wird. Sein Kontakt arbeitet im allgemeinen auf die Auslösespulen der Transformatorenschalter, da bei Ansprechen des Stoßschwimmers stets eine schwere Störung im Transformator vorliegt.

Ein gleichfalls häufig angewandter Transformatorenschutz ist der Differentialschutz. Man vergleicht in einem Relais die Ströme, die in den einzelnen Phasen vor und hinter dem

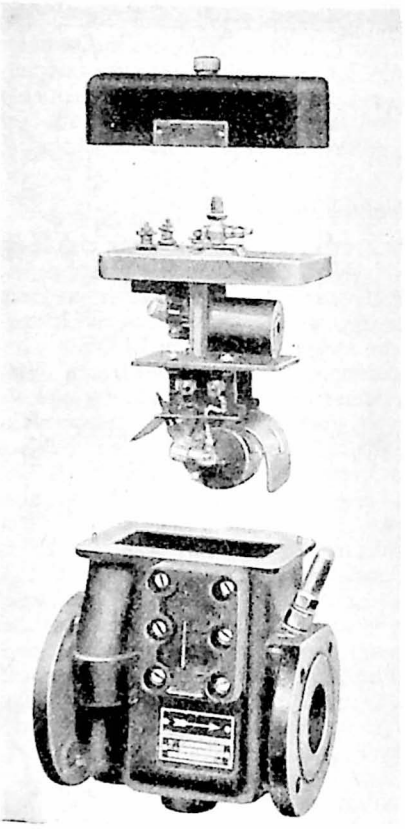


Abb. 68 Buchholzrelais mit 2 Schwimmern.

Transformator fließen. Wählt man die Übersetzungsverhältnisse der Stromwandler entsprechend dem des Transformators und gleicht eine der Schaltgruppe entsprechende Phasenverschiebung durch einen auf der Sekundärseite der Wandler liegenden Hilfswandler aus, so sind bei gesundem Transformator die Stromkräfte im Differentialrelais ausgeglichen, wenn man von dem verschwindend kleinen Magnetisierungsstrom absieht. Bei Windungs- oder Kurzschlüssen dagegen tritt einseitig ein Überstrom auf, der das Relais zum Ansprechen bringt.

Der Differentialschutz erfaßt natürlich auch Fehler, die über Deckel des Transformators auftreten oder in den Leitungen, die zwischen beiderseitigen Schutzstromwandlern liegen. Die Differentialrelais müssen mit einer Einrichtung versehen werden,

die verhindert, daß der Einschaltstromstoß (vgl. Abb. 61), der als Unsymmetriestrom das Relais erregt, zur Abschaltung des Transformators führt.

Überspannungsableiter, wenigstens auf der Oberspannungsseite, gehören heute zur normalen Schutzausrüstung eines Transformators.

Nächst den Überspannungen ist die Wärme der schlimmste Feind des Transformators. Übermäßige Erwärmung der Wicklung altert rasch die Isolation und führt damit zum vorzeitigen Tod des Transformators. Eine sorgfältige Überwachung der Temperatur darf deshalb ebenfalls zu den Schutzeinrichtungen gezählt werden. Meist werden die Thermometer mit Maximalkontakten versehen, die bei Erreichung einer bestimmten Temperatur ein Warnungssignal auslösen oder eine Zusatzkühleinrichtung in Betrieb setzen. Da die Temperatur mit einfachen Mitteln nur im Öl gemessen werden kann, andererseits aber eine geraume Zeit vergehen kann, bevor bei Überlastung die Öltemperatur genügend gestiegen ist, um auf beunruhigende Werte zu kommen, hat man neben der Temperaturüberwachung stets auch noch den Betriebsstrom zu kontrollieren, wenn man vor schädlichen Erwärmungen in der Wicklung infolge starker, aber kurzzeitiger Überströme sicher sein will. Der ideale Thermoschutz ist die Temperaturmessung an der heißesten Stelle der Wicklung. Diese ist zwar durchführbar, erfordert aber einen Aufwand, der zusätzliche Fehlerquellen für den Transformator mit sich bringt und deshalb keinen Eingang in die Praxis gefunden hat. Verhältnismäßig genau kann man die Wicklungstemperatur mit Hilfe des „Thermischen Abbildes" verfolgen. Man bringt im Öl des Transformators unter dem Deckel eine Spule an, die so isoliert ist, daß ihre thermische Zeitkonstante die gleiche Größe hat wie die Zeitkonstante der zu überwachenden Wicklung. Diese Spule wird über einen Stromwandler mit einem dem Betriebsstrom des Transformators proportionalen Strom beschickt. Bei geeigneter Bemessung des Querschnitts des Spulendrahtes nimmt dieser die gleiche Temperatur an, die in der Wicklung herrscht. Die Temperatur in der Spule kann nun entweder mittels eines Thermometers oder durch Messung des

mit der Temperatur veränderlichen Widerstandes festgestellt werden (Abb. 69). Das thermische Abbild gestattet so, den Transformator bis zu seiner Höchsttemperatur auszulasten.

Als Überstromschutz für Transformatoren werden Sicherungen, primäre und sekundäre verzögerte Überstromrelais sowie Impedanzrelais verwendet.

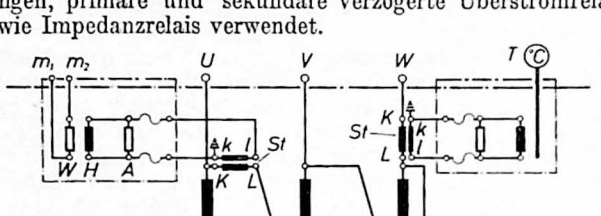



Abb. 69. Thermisches Abbild. *Tr* = Transformator, *St* = Stromwandler, *KL kl* = Primär- u. Sekundäranschlüsse des Stromwandlers, *W* = Widerstandsthermometer, *H* = Hilfswicklung, *A* = Abgleichwiderstand, *T* = Quecksilberthermometer.

### 23. Prüfung

Nach der Fertigstellung ist jeder Transformator einer Prüfung zu unterwerfen, und zwar aus dreierlei Gründen: Es sollen etwaige Fehler, die bei der Fabrikation nicht bemerkt wurden, aufgedeckt werden, die Kennwerte, wie Übersetzung, Kurzschlußspannung, Leerlaufstrom und -verluste, Kurzschlußverluste und Erwärmung, müssen kontrolliert werden, und schließlich soll durch elektrische Überbeanspruchung, deren Dosierung in VDE 0532 festgelegt ist, die Widerstandsfähigkeit des Transformators gegen solche Beanspruchungen nachgewiesen werden, denen er im Betrieb ausgesetzt sein kann. Die wichtigsten Prüfmethoden sind im folgenden zuammengestellt.

Die Schaltgruppe des Transformators kann im Werk leicht durch Kontrolle von Wickelsinn und Anschlußleitungen zu Klemmen und Nachbarphasen festgestellt werden. Will man prüfen, ob ein Transformator die gleiche Schaltgruppe hat wie ein zum Parallellauf bestimmter, so schaltet man beide Transformatoren HV-seitig durch Verbindung

gleichnamiger Klemmen parallel an das Netz. Auf der Niederspannungsseite verbindet man, falls vorhanden, die Nullpunkte, sonst 2 gleichnamige Phasen miteinander und prüft mittels Lampe oder Spannungsmesser die zwischen den anderen gleichnamigen Phasen herrschende Spannung, die bei richtiger Schaltgruppe Null sein muß. Ohne Vergleichstransformator stellt man die Schaltgruppe durch verschiedene Summen- oder Differenzmessungen je einer Ober- und Unterspannung fest, deren Ergebnis mit der Größe der einer Schaltgruppe entsprechend zusammengesetzten OSp- und USp-Spannungsvektoren übereinstimmen muß.

Die Prüfung des Übersetzungsverhältnisses erfolgt mit Hilfe von möglichst genauen Spannungsmessern durch direkte Messung der primären und sekundären Klemmenspannungen des leerlaufenden Transformators. Die Messung wird meist nicht bei Nennspannung, sondern bei einer handlicheren Niederspannung durchgeführt. Der Spannungsabfall des Leerlaufstromes bleibt bei dieser Messung vernachlässigt, was wegen seiner Kleinheit zulässig ist. Hat man bei großem Übersetzungsverhältnis nur ein Voltmeter zur Hand, so schaltet man die Unterspannungswicklung mit der Oberspannungswicklung gegensinnig in Reihe und mißt die OSp-Klemmenspannung $U_1$ und die Differenzspannung $U_d$. Das Übersetzungsverhältnis errechnet sich zu

$$\ddot{u} = \frac{U_1}{U_1 - U_d}.$$

Da die Windungsspannung im allgemeinen nur einige $^0/_{00}$ der Oberspannung beträgt, ist die Kontrolle der richtigen Windungszahl durch Spannungsmessung eine recht ungenaue Methode, so daß die Kontrolle der Übersetzung mittels Spannungsmessung nur grobe Abweichungen vom Windungszahlverhältnis oder Schaltfehler aufdeckt. Während der Fabrikation wird deshalb schon die Einhaltung der richtigen Übersetzung durch genaue Zählung der Windungen jeder Spule — Zählwerke an den Wickelmaschinen — geprüft.

Leerlaufstrom und Leerlaufverluste werden bei Erregung des Transformators von der Niederspannungsseite ge-

messen. Man mißt meist nicht nur bei Nennspannung, sondern auch bei darunter- und darüberliegenden Werten. Wegen der magnetischen Unsymmetrie des Drehstromtransformators wird der Strom in allen 3 Phasen, die Verlustleistung nach der Zweiwattmeterschaltung gemessen. Soweit angängig, wird ohne Strom- und Spannungswandler mit isoliert aufgestellten Instrumenten gemessen. Bei Großtransformatoren werden in manchen Werken die Leerlaufverluste schon gemessen, bevor die Wicklung aufgebracht wird. Der fertig geschichtete Kern wird mit einer Hilfswicklung aus einigen Kabelwindungen versehen und so erregt, daß die Induktion dem Wert bei Nennspannung des fertigen Transformators entspricht. Durch diese Messung überzeugt man sich in einem frühen Stadium der Fabrikation, ob die garantierten Leerlaufverluste eingehalten sind; gleichzeitig hat man eine Kontrolle, daß beim Aufbau des Kernes keine Eisenschlüsse eingetreten sind, die sich durch Abweichung der gemessenen von den gerechneten Verlusten und anomale partielle Erwärmungen verraten würden.

Kurzschlußspannung und Kurzschlußverluste werden im Kurzschlußversuch ermittelt, bei dem die Niederspannungsseite des Transformators kurzgeschlossen wird und die Spannung an den Oberspannungsklemmen solange gesteigert wird, bis der Nennstrom in den Transformator fließt. Die hierzu notwendige Spannung ist die Kurzschlußspannung, die im allgemeinen in Prozenten der Nennspannung angegeben wird. Die hierbei vom Transformator aufgenommene Leistung, die wieder mit 2 Wattmetern direkt gemessen wird, stellt die Kurzschluß- oder Wicklungsverluste dar. Da die Wicklungsverluste bei 75° C zu garantieren sind, müssen die im Kurzschlußversuch gemessenen Verluste von der Meßtemperatur auf 75° C umgerechnet werden. Roh kann man für jedes Grad Temperaturdifferenz 0,4% Verluststeigerung rechnen. Wird also der Kurzschlußversuch bei 25° C ausgeführt, so müssen die dabei gemessenen Verluste um 20% erhöht werden, um die Verluste bei 75° C zu erhalten. Genau genommen, sind bei der Umrechnung die Gleichstrom- von den Wirbelstromverlusten zu trennen, da nur erstere bei

wachsender Temperatur steigen, letztere aber fallen. Man muß also mit der Wheatstone-Brücke die Widerstände aller Transformatorwicklungen messen und dann rechnerisch mittels der Nennströme der Wicklungen $\Sigma J^2 \cdot r$ bilden. Die Differenz zwischen den Kurzschlußverlusten und $\Sigma J^2 r$ sind die Wirbelstromverluste. Ist $\vartheta$ die Temperatur, bei der der Kurzschlußversuch ausgeführt wurde, so erfolgt die Verlustumrechnung auf 75° C nach VDE so, daß die dem Gleichstromwiderstand entsprechenden Verluste im Verhältnis $\frac{310}{235 + \vartheta}$ zu erhöhen, die Wirbelstromverluste im Verhältnis $\frac{235 + \vartheta}{310}$ zu erniedrigen sind.

Die Kurzschlußspannung setzt sich aus einer induktiven und einer Ohmschen Komponente zusammen. Da aus den Kurzschlußverlusten der äquivalente Ohmsche Widerstand des Transformators (enthaltend Gleichstrom- und Wirbelstromwiderstand) hervorgeht, läßt sich die induktive Komponente der Kurzschlußspannung als geometrische Differenz zwischen der ganzen Kurzschlußspannung und der Ohmschen Komponente errechnen. Bei der Rechnung bezieht man alle Größen auf eine Phasenspannung, wobei der Ohmsche Widerstand aus $^1/_3$ der Gesamtverluste beim Drehstromtransformator (Verluste pro Schenkel) zu errechnen ist. Mißt man beim Kurzschlußversuch auch noch die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung, so hat man einen Kontrollwert für die Komponenten der Kurzschlußspannung.

Der Spannungsabfall wird nach Größe und Phase am besten rechnerisch aus den Ohmschen und induktiven Widerständen, die der Kurzschlußversuch ergab, ermittelt. (Vgl. auch Abschnitt 9.) Eine direkte Messung des Spannungsabfalles erforderte die meist nicht durchführbare Belastung des Transformators u. U. mit Strom wechselnder Phasenlage.

Die ausreichende Isolierfestigkeit der Transformatoren muß durch verschiedene Prüfungen nachgewiesen werden, die Wicklungsprüfung und die Windungsprüfung, die in der angegebenen Reihenfolge durchzuführen sind. Zwischen

beiden Prüfungen kann eine Stoßspannungsprüfung eingefügt werden.

Durch die Wicklungsprüfung wird die elektrische Festigkeit der Wicklungen gegen Eisenkern, Konstruktionsteile, Kessel und Nachbarwicklungen, also die Hauptisolation, geprüft. Zu diesem Zwecke wird die zu prüfende Wicklung durch einen Prüftransformator, dessen einer Pol geerdet ist, auf eine bestimmte Spannung gegen Erde gebracht. Die anderen Wicklungen werden miteinander und mit dem Kessel verbunden und geerdet. Die Prüfung erfolgt bei 50 Hz, ihre Höhe in Vielfachen der Nennspannung der zu prüfenden Wicklung ergibt sich aus der folgenden Tabelle, ihre Dauer beträgt 1 Min.:

| Reihe | Höchstzulässige Betriebsspannung der zu prüfenden Wicklung kV | Prüfspannung *Up* kV |
|---|---|---|
| 0,5 | 0,60 | 2,5 |
| 1 | 1,15 | 3,5 |
| 3 | 3,5 | 10 |
| 10 | 11,5 | 30 |
| 20 | 23 | 50 |
| 30 | 35 | 70 |
| 60 | 70 | 120 |
| 110 | 125 | 220 |
| 150 | 170 | 300 |
| 220 | 250 | 440 |
| 380 E | 420 | 640 |

Isolationsdefekte machen sich durch plötzlichen Anstieg des Stromes im Prüftransformator bemerkbar.

Die Windungsprüfung kontrolliert die Festigkeit der Isolation zwischen benachbarten Windungen. Sie wird bei doppelter Nennspannung durchgeführt und dauert 5 Min. Für die Windungsprobe wird der Transformator im Leerlauf auf doppelte Spannung erregt. Um übermäßige Sättigung des Eisenkerns und hohe Erregerströme zu vermeiden, wird die Prüfung bei doppelter Nennfrequenz durchgeführt. Wählt man eine höhere Frequenz für diese Prüfung, so kann die Zeit für

diese Prüfung angemessen herabgesetzt werden, jedoch nicht unter 2 Minuten.

Die atmosphärischen Überspannungen, die aus den Freileitungsnetzen in Gestalt von Wanderwellen auf die Transformatoren treffen und in sie eindringen, erreichen Spitzenwerte, die weit über den Scheitelwerten der Prüfspannungen bei der Wicklungs- und Windungsprüfung liegen. Andererseits ist die Beanspruchungsdauer der atmosphärischen Überspannungen klein gegenüber den Zeiten, während denen die von Schalthandlungen verursachten Überspannungen die Isolation belasten. Schließlich ist noch zu bedenken, daß die Spannungsverteilung in der Wicklung bei spannungsmäßiger Stoßbelastung — wie sie bei Wanderwellen eintritt (vgl. Abschn. 21) — stark von der Verteilung der Spannung bei Normalbetrieb abweicht. Aus den angeführten Gründen muß eine Stoßprüfung des Transformators, die seine Widerstandsfähigkeit gegen äußere Überspannungen erweist, als zweckmäßig angesehen werden.

Die Hauptschwierigkeit bei der Durchführung der Stoßprüfung liegt in der Methode, mit der man feststellt, ob die Stoßprüfung gelungen oder ob ein Fehler eingetreten ist. Wegen der Kurzzeitigkeit der Vorgänge kommen zur Überwachung normale Meßinstrumente nicht in Frage, man muß sich des Kathodenstrahloszillographen bedienen. Für die Fehlerfeststellung und Fehlerortung bei der Stoßprüfung sind verschiedene Methoden entwickelt worden. Alle beruhen sie auf dem Vergleich von zwei Kathodenstrahloszillogrammen, von denen eines die Verhältnisse des gesunden Transformators, das andere die Verhältnisse während der Prüfung darstellt. Dabei wird die erste Aufnahme bei einer so bescheidenen Spannung gemacht (z. B. 50% der Prüfspannung), daß mit Sicherheit noch kein Fehler auftreten kann. Abb. 70 zeigt, daß die Oszillogramme bei Eintreten eines Fehlers sich in charakteristischer Weise ändern. Die verschiedenen Stoßprüfmethoden unterscheiden sich im übrigen wesentlich nur durch die Wahl der Größe, die man als Kriterium bei der Prüfung heranzieht. Meist dürfte der Strom oszillographiert werden, der am Ende der gestoßenen Wicklung zur Erde abfließt, man kann aber auch den Strom

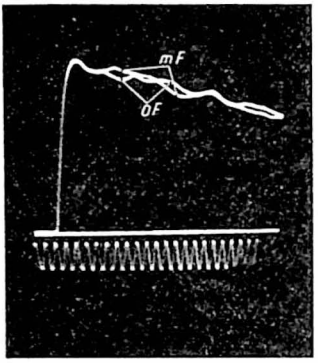



Abb. 70 a.
Oszillogramme bei Stoß mit Vollwelle.
Angelegte Stoßspannung ($KO_1$),
$oF$: ohne Fehler, $mF$: mit Fehler,
Aufnahmezeit: 18 $\mu$s,
Eichfrequenz: 1 MHz.

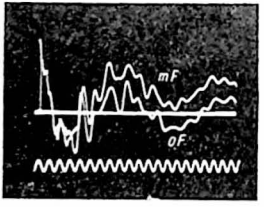



Abb. 70 b.
Spannungsabfall $R$ ($KO_2$) vgl. Abb. 71,
$oF$: ohne Fehler, $mF$: mit Fehler,
Aufnahmezeit: 200 $\mu$s,
Eichfrequenz: 100 kHz.

als Kriterium verwenden, der kapazitiv auf eine Nachbarwicklung übertragen wird und von dort zur Erde fließt. Schließlich kann man auch den Verlauf der Spannung an der Klemme der gestoßenen Wicklung selbst als Vergleichsmaßstab verwenden, wobei allerdings durch besondere Kunstgriffe die Empfindlichkeit der Anzeige gesteigert werden muß. Abb. 71 zeigt im Prinzip die Schaltung bei einer Stoßprüfung.

Eine Erwärmungsprobe wird im allgemeinen nur als Typenprüfung durchgeführt, weil sie viel Zeit und Aufwand erfordert. Volle Belastung des Transformators durch Anschluß von Verbrauchern, welche die Nennleistung abnehmen, ist im Prüffeld wohl immer unmöglich. Hat man aber 2 gleiche Transformatoren zur Verfügung, so kann man die Erwärmungsfahrt nach der sogen. Rückarbeitsmethode durchführen. Man schaltet die beiden Transformatoren primär parallel, sekundär gegeneinander (Abb. 72). Da die Spannungen entgegengesetzt gleich sind, fließt sekundärseitig kein Strom, und die Transformatorengruppe entnimmt dem Netz nur die Leerlaufleistung. Erzeugt

man durch Änderung von Anzapfungen z. B. eine Differenzspannung von der Größe der doppelten Kurzschlußspannung der Transformatoren, so fließt in beiden Transformatoren gerade der Nennstrom. Die Transformatoren sind voll belastet, ohne daß das Netz mehr als die Verlustleistung zu decken hätte; der Laststrom wird als vor- bzw. nacheilender Blindstrom zwischen den beiden Transformatoren ausgetauscht.

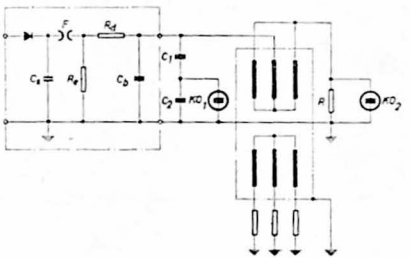


Abb. 71. Prinzipschaltung der Stoßprüfung eines Transformators.

$C_1$ $C_2$: Kapazitiver Spannungsteiler, $C_b$: Belastungskapazität, $C_g$: Kapazität des Stoßgenerators, $F$: Entladefunkenstrecke, $KO_1$ $KO_2$: Kathodenstrahloszillographen, $R_d$: Dämpfungswiderstand, $R_e$: Entladewiderstand, $R$: Meßwiderstand in der Erdverbindung.

Besitzen die Transformatoren keine Anzapfungen, so kann die den Laststrom treibende EMK auch von einer fremden Stromquelle in den Sekundärkreis transformiert werden.

Steht überhaupt nur ein Transformator zur Verfügung, so kann man sich noch folgendermaßen helfen: Man schaltet beide Wicklungen in Dreieck und erregt von der Oberspannungsseite. Das Dreieck der Unterspannungsseite ist an einem Eckpunkt geöffnet. Da die Summe der 3 Phasenspannungen gleich Null ist, herrscht zwischen den Enden des geöffneten Dreiecks keine Spannung

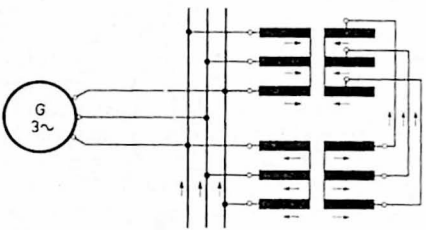



Abb. 72. Stromverlauf bei Rückarbeitsmethode.

(der Grundfrequenz) 9 und man kann hier eine fremde EMK einfügen, die, sofern sie die dreifache Größe der Streuspannung hat, den Vollaststrom durch die Wicklung treibt (Abb. 73). Auf der Oberspannungsseite bilden sich entsprechende Gegen-AW aus, so daß der Transformator wiederum voll belastet ist.

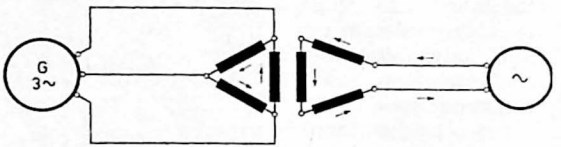



Abb. 73. Rückarbeitsmethode mit Hilfsstromquelle.

Häufig erleichtert man sich die Erwärmungsprobe dadurch, daß man auf die Erregung des Transformators verzichtet, also den Transformator im Kurzschluß hochfährt. Steigert man den Strom dabei soweit über den Nennstrom, daß in der Wicklung zusätzlich noch Verluste in Höhe der vorher gemessenen Leerlaufverluste entstehen, so ist einwandfrei festzustellen, welche Temperatur der Transformator bei Vollast annimmt.

Bei Erwärmungsproben wird immer eine Kurve aufgenommen, die Auf- und Abstieg der Temperatur in Abhängigkeit von der Zeit ergibt. Die Öltemperatur wird durch Thermometer gemessen, die Temperatur des Kernes durch Thermoelemente und die der Wicklung entweder auch durch Thermoelemente — was die Temperatur am Einbauort des Thermoelementes ergibt und recht umständlich ist — oder häufiger durch Gleichstrom-Widerstandsmessung, wobei die mittlere Wicklungstemperatur aus der Veränderung des Widerstandes zu errechnen ist.

# Sachverzeichnis


Amperewindungen 8.
Amperewindungsgleichgewicht 9.
Ausdehnungsgefäß 86.
Ausschaltüberspannung 110.
Ausschaltvorgänge 109f.
Autotransformator 54.
Axialschub von Wicklungen 31.

Bandkern 45, 46.
Basistransformator 53.
Blech, kaltgewalztes 18.
Buchholzrelais 117.

Differentialschutz 117.
Doppelkonzentrische Wicklung 25.
Doppelspulen 70.
Drehstromtransformator 46.
Dreieckschaltung 100.
Dreieckwicklung 51, 100.
Durchführung 6, 77.
—kittlos 77.
Durchgangsleistung 53.

Einphasentransformator 45.
Einschaltvorgänge 104f.
Eisenbrand 66, 117.
Eisenkern 6, 12, 63f.
Eisenverluste 18.
Erwärmungsprobe 120.

Fluß (magnetischer) 8.
Füllfaktor 64.
Fünfschenkeltransformator 51.
Funkenstrecke 80.

Gleichstromverluste 32, 122.

Hauptisolation 75, 114.
Höhentransformator 53.
Hysteresis 16.
Hysteresis-Verluste 16, 17.

Induktion (magnetische) 10,13, 16.
Isolation, Haupt- 75, 114.
— Windungs- 115.
Isolierfestigkeit 123.

Jahreswirkungsgrad 37.
Jansen-Prinzip 60.
Joch 6.
Joch, stumpf gestoßen 65.
Jochquerschnitt 51.

Kappsches Dreieck 41, 42.
Kern, bolzenlos 66.
— Erdung 68.
— Kühlschlitze 68.
Kernbleche 64.
Kerntype 45.
Kessel 6, 81.
— Glattblech- 81.
— Radiatoren- 83, 89.
— Röhren- 81, 89.
— Wellblech- 81, 88.
Klemmenspannung 8.
Kondensatordurchführung 78.
Konvektion 87.
Kreisfrequenz 10.
Kühlschlitz 68.
Kühlung 81f.
— Luft- 81.
— Wasser- 85.
Kühlung der Wicklung 77.
Kupferverluste 31.
— Prüfung 122.
Kurzschlußspannung 9, 41, 57.
— Prüfung 122.

Lagenwicklung 73, 116.
Lastumschalter 60.
Leerlaufstrom 8.
Leerlaufverluste 8.
— Prüfung 121.
Leistung 6.
Leitfähigkeit von Kupfer 32.
Luftspalt 64.

Magnetisierungsleistung 12.
Magnetisierungslinie 13.
Magnetisierungsstrom 8, 11, 14, 19.
Magnetomotorische Kraft 8, 11, 19.
Manteltransformator 45, 53.
Manteltype 45.
Materialaufwand 89.
Mehrrohrdurchführung 79
Mehrwicklungstransformator 6.

Nullpunktbelastung 52.
Nullpunktverlagerung 49 50.

Oberspannungswicklung 6.
Oberwellen 14, 15.
Öl 6, 86.
Ölkonservator 86.
Ölübertemperatur 87.

Parallelfunkenstrecke 80.
Parallellauf 102, 104
— Drosseln 102.
Primärwicklung 6.
Prüfung 120f.
— der Kurzschlußspannung 122.
— der Kurzschlußverluste 122.
— der Leerlaufverluste 121.
— der Schaltgruppe 120.
— der Übersetzung 121.

Radiatorenkessel 83, 89.
Regeltransformatoren 58f.

Remanenz 16, 105.
Röhrenkessel 81, 89.
Röhrenwicklung 70.
Rückarbeitsmethode 126.

Schaltspule 63.
Scott-Transformator 53.
Sekundärwicklung 6.
Spannungsänderung 42f.
Spartransformator 54f.
Spulenwicklung 70.
Schaltgruppen 101.
Scheibenwicklung 68.
Schenkel 6, 64.
Schutzeinrichtungen 117f.
Stoßfuge 64.
Stoßüberspannung 111f.
Sternschaltung 99.
Stoßprüfung 125.
Strahlung 87.
Streufluß 9, 19.
Streuinduktivität 24.
Streukanal 23.
Streureaktanz 24.
Streuspannung 9, 22, 23.
Streuung 19f.
Stromkräfte 26f.
— axial 27.
— radial 28.

Temperatur, Überwachung 119.
Tertiärwicklung 6, 52, 100.
Thermisches Abbild 119.
Transformatorbank 46.
Typenleistung 7, 56.

Übersetzungsverhältnis 8, 12.
— Prüfung 121.
Überspannungs-Beanspruchung 111f.
Überschaltimpedanz 60.
Überstromschutz 120.
Unsymmetriekräfte 30.
Unterspannungswicklung 6.

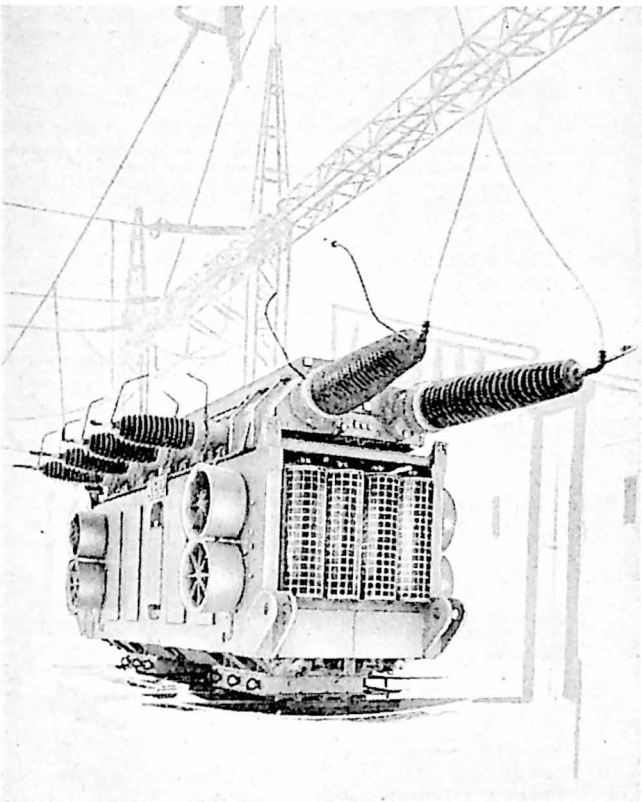
V-Schaltung 54.
Verlagerung des Nullpunktes 50.
Verluste:
Eisen- 18.
— Hysteresis- 17.
— Kupfer- 31f.
— Leerlauf- 8.
— Wicklungs- 9.
— Wirbelstrom- 17.
Verlustziffer 18.
Verstürzte Wicklung 71.

Wachstumsgesetz 93f.
Wähler 60.
Wandertransformator 86.
Wärmeabführung bei:
Radiatorenkästen 89.
— Röhrenkästen 89.
— Wellblechkästen 88.
Wärmeleitung 87.
Wasserkühlung 85.
Wendelwicklung 73.
Wendeschalter 61.
Wicklung 6, 68f.
— schwingungsfrei 116.
Wicklungsisolation 75.
Wicklungsprobe 124.
Wicklungsverluste 9, 31f.
Windungsprobe 124.
Windungsspannung 24.
Winkelringe 75.
Wirbelstromverluste 17, 18, 33, 122.
Wirkungsgrad 5, 35.
— Jahres- 37.

Zickzackschaltung 100.
Zusatzkühlung 84.
Zusatzverluste 31.
Zylinderwicklung 70.

# AEG-Wandertransformator

Leistung: 100 MVA, Übersetzung: 220 ± 11%/110/10,5 kV,
Schaltgruppe: ⅄ ⅄ △



ZWA 9811

AEG ALLGEMEINE ELEKTRICITÄTS-GESELLSCHAFT

# *Fachliteratur von* Fritz Raskop

## Berechnungsbuch des Elektromaschinenbauer-Handwerkers (Ankerwicklers)

**Anleitung und Tabellen für die Berechnung der Wickeldaten bei Instandsetzungen, Neu- und Umwicklungen von elektrischen Maschinen und Apparaten**

8., vermehrte und verbesserte Auflage. Oktav. XVI, 298 Seiten. Mit 74 Textabbildungen und 95 Tabellen. 1959. Ganzleinen DM 24,—

## Der Katechismus für die Ankerwickelei

**Leitfaden für die Herstellung der Wicklungen an elektrischen Maschinen, Transformatoren, Starkstromapparaten und Kleinstmotoren**

12., vermehrte und verbesserte Auflage. Mit 422 Abbildungen und Wicklungs-Schaltbildern. 39.—42. Tausend. Groß-Oktav. XVIII, 516 Seiten. 1957. Ganzleinen DM 24,—

## Das Elektromaschinenbauer-Handwerk

**Instandsetzung, Neuwicklung und Umbau elektrischer Maschinen, Transformatoren und Apparate**

3. Auflage. Oktav. 384 Seiten. 1949. Ganzleinen DM 18,—

## Die Meisterprüfung im Elektromaschinenbauer-Handwerk

**Lehr- und Hilfsbuch für die Vorbereitung zur Meisterprüfung. Handbuch für die Mitglieder der Meister-Prüfungskommission**

5., erweiterte und verbesserte Auflage. Oktav. VIII, 149 Seiten. 1959. DM 15,—

## Die Schnellbestimmung der Wickeldaten

**für Drehstrommotoren, Einphasen-Wechselstrommotoren und Kleinst-Kollektormotoren mit einem Anhang: Ursprungswickeldaten (Wickeldaten-Archiv)**

3., verbesserte und vermehrte Auflage. Mit 7 Abbildungen, 69 Originaltabellen des Verfassers. Oktav. XI, 132 Seiten. 1958. DM 28,—

## 38 Schaltbilder

für Dreiphasen-Zweischichten-Stabwicklungen. Oktav. 8 Seiten und 38 Schaltbilder. 1960. In Mappe DM 35,—

## 43 Schaltbilder

in DIN A4-Format auf Karton, für Drehstrom-Einschicht-, Zweischichten- und polumschaltbare Wicklungen. DM 20,—

## 76 Wicklungs-Schaltbilder

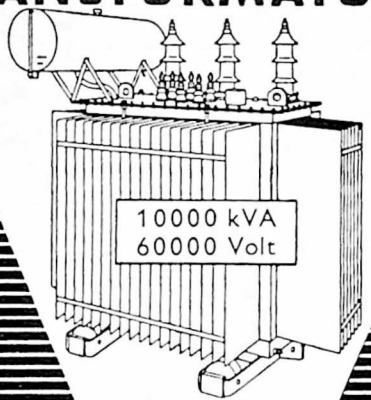
DIN A 4. 8 Seiten und 76 Schaltbildern. 1957. In Mappe DM 32,—

---

TECHNISCHER VERLAG HERBERT CRAM · BERLIN W 30

# LAHMEYER

## TRANSFORMATOREN




ELEKTRIZITÄTS-ACTIEN-GESELLSCHAFT
VORM. W. LAHMEYER & CO.
WERK MECHERNICH / EIFEL

# Fachbücher der Elektrotechnik

H. Gerstenberg

## Einführung in die Elektrotechnik

Oktav. Mit 326 Abbildungen und 129 Beispielen. XII, 367 Seiten. 1953. Halbleinen DM 16,—

A. Däschler

## Elektrotechnik

**Ein Lehrbuch für den Praktiker**

2., verbesserte Auflage. Mit 266 Abbildungen. Oktav. VIII, 214 Seiten. 1956. DM 8,60

G. Maier

## Die Grundlagen der Elektrotechnik

2., vollständig umgearbeitete und vermehrte Auflage. Groß-Oktav. Mit 397 Textabbildungen und 164 durchgerechneten Beispielen. 527 Seiten. 1950. Halbleinen DM 12,—

Theodor Königshofer

## Die praktische Berechnung elektrischer Maschinen

**Einführung in Maßsystem und Grundlagen sowie allgemeinverständliche Berechnung von Gleich- und Wechselstrommaschinen**

Oktav. Mit 126 Abbildungen. XVI, 319 Seiten. 1959. Ganzleinen DM 38,—

## Die Wicklungen elektrischer Maschinen

**Allgemeinverständliche Einführung in die Wicklungen und deren Wirken in elektrischen Maschinen**

Oktav. Mit 139 Textabbildungen. 128 Seiten. 1956. DM 12,80

## Lichtbogen-Schweißmaschinen

**Kurze Einführung in die Wirkungsweise verschiedenartiger Schweißmaschinen und deren Verhalten im Betrieb unter Berücksichtigung der Schutzgasschweißung**

2., erweiterte Auflage. Oktav. Mit 28 Textabbildungen. 63 Seiten. 1960. DM 6,20

**Unser Auswahlverzeichnis TECHNIK erhalten Sie kostenlos bei Ihrem Buchhändler**

TECHNISCHER VERLAG HERBERT CRAM · BERLIN W 30

Hans W. Schleiden

## Tabellenbuch

**zur Umrechnung metrischer Maße in englische Maße**

**Tables for the Conversion metric system of measurement of the British System**

Oktav. VIII, 298 Seiten. 1961. Kunststoffeinband
DM 38,—

A. Güntherschulze / H. Betz

## Elektrolytkondensatoren

**Ihre Entwicklung, wissenschaftliche Grundlage, Herstellung, Messung und Verwendung**

2., verbesserte Auflage. Groß-Oktav. Mit 142 Abbildungen.
VII, 293 Seiten. 1952. Ganzleinen DM 36,—

TECHNISCHER VERLAG HERBERT CRAM · BERLIN W 30

---

W. Müller / E. Schulze

## Technische Tabellen und Formeln

5., verbesserte und erweiterte Auflage
Mit 114 Abbildungen und 99 Tafeln. 165 Seiten. DM 3,60
(Sammlung Göschen Band 579)

---

WALTER DE GRUYTER & CO · BERLIN W 30

# SAMMLUNG GÖSCHEN *Elektrotechnik*

Klein-Oktav. Je Band DM 3,60; Doppelband DM 5,80

---

**Grundlagen der allgemeinen Elektrotechnik** von Dr. *Otto Mohr*
260 Seiten. 136 Bilder, 14 Tafeln. 1961. Band 196/196a

**Die Gleichstrommaschine** von Dr.-Ing. *Karl Humburg*
I: 102 Seiten. 59 Abbildungen. 1956. Band 257
II: 101 Seiten. 38 Abbildungen. 1956. Band 881

**Die Synchronmaschine** von Dr.-Ing. *Walter Putz*
91 Seiten. 64 Abbildungen. 1962. Band 1146

**Induktionsmaschinen** von Dr. *Franz Unger*
2., erweiterte Auflage. 142 Seiten. 49 Abbildungen. 1954. Band 1140

**Die komplexe Berechnung von Wechselstromschaltungen** von *Hans Heinrich Meinke*
2. Auflage. 180 Seiten. 120 Abbildungen. 1957. Band 1156/1156a

**Theoretische Grundlagen zur Berechnung der Schaltgeräte** von Dr.-Ing. *Fritz Kesselring*
3. Auflage. 144 Seiten. 92 Abbildungen. 1950. Band 711

**Einführung in die Technik selbsttätiger Regelungen** von Dr.-Ing. *Werner zu Megede*
2., durchgesehene Auflage. 176 Seiten. 86 Abbildungen. Band 714/714a

**Elektromotorische Antriebe** (Grundlagen für die Berechnung) von Prof. Dr.-Ing. *A. Schwaiger*
3., neubearbeitete Auflage. 96 Seiten. 34 Abbildungen. 1952. Band 827

**Überspannungen und Überspannungsschutz** von Dr. Ing. *Gerhard Frühauf*
Durchgesehener Neudruck. 122 Seiten. 98 Abbildungen. 1950. Band 1132

**Graphische Darstellung in Wissenschaft und Technik** von Prof. Dr. *Marcello Pirani*
3., erweiterte Auflage, bearbeitet von Professor Dr. Johannes Fischer unter Benutzung der von Prof. Dr. I. Runge besorgten 2. Auflage. 216 Seiten. 104 Abbildungen. 1957. Band 728/728a

---

WALTER DE GRUYTER & CO · BERLIN W 30

# SAMMLUNG GÖSCHEN

## GESAMTVERZEICHNIS

Jeder Band DM 3,60 · Doppelband DM 5,80

Frühjahr 1965

WALTER DE GRUYTER & CO., BERLIN 30

# Inhaltsübersicht


Biologie . . . . . 16
Botanik . . . . . 17
Chemie . . . . . 15
Deutsche Sprache u. Literatur 7
Elektrotechnik . . . . . 19
Englisch . . . . . 8
Erd- u. Länderkunde . . . . 10
Geologie . . . . . 18
Germanisch . . . . . 8
Geschichte . . . . . 5
Griechisch . . . . . 9
Hoch- u. Tiefbau . . . . . 23
Indogermanisch . . . . . 8
Kartographie . . . . . 10
Kristallographie . . . . . 18
Kunst . . . . . 5
Land- u. Forstwirtschaft . . 18
Lateinisch . . . . . 9
Maschinenbau . . . . . 20
Mathematik . . . . . 12
Mineralogie . . . . . 18
Musik . . . . . 5
Orientalistik . . . . . 9
Pädagogik . . . . . 4
Philosophie . . . . . 3
Physik . . . . . 14
Psychologie . . . . . 4
Publizistik . . . . . 10
Religion . . . . . 4
Romanisch . . . . . 8
Slavische Sprachen . . . . . 9
Soziologie . . . . . 4
Statistik . . . . . 10
Technik . . . . . 19
Technologie . . . . . 16
Volkswirtschaft . . . . . 10
Vermessungswesen . . . . . 21
Wasserbau . . . . . 22
Zoologie . . . . . 17
Autorenregister . . . . . 31
Bandnummernfolge . . . . 24

# Geisteswissenschaften

## Philosophie

**Einführung in die Philosophie** von *H. Leisegang* †. 5. Auflage. 146 Seiten. 1963. (281)

**Hauptprobleme der Philosophie** von *G. Simmel* †. 8., unveränderte Auflage. 177 Seiten. 1964. (500)

**Geschichte der Philosophie**

I: Die griechische Philosophie von *W. Capelle*. 1. Teil. Von Thales bis Leukippos. 2., erweiterte Auflage. 135 Seiten. 1953. (857)

II: Die griechische Philosophie von *W. Capelle*. 2. Teil. Von der Sophistik bis zum Tode Platons. 2., stark erweiterte Auflage. 144 Seiten. 1953. (858)

III: Die griechische Philosophie von *W. Capelle*. 3. Teil. Vom Tode Platons bis zur Alten Stoa. 2., stark erweiterte Auflage. 132 Seiten. 1954. (859)

IV: Die griechische Philosophie von *W. Capelle*. 4. Teil. Von der Alten Stoa bis zum Eklektizismus im 1. Jh. v. Chr. 2., stark erweiterte Auflage. 132 Seiten. 1954. (863)

V: Die Philosophie des Mittelalters von *J. Koch*. In Vorbereitung. (826)

VI: Von der Renaissance bis Kant von *K. Schilling*. 234 Seiten. 1954. (394/394a)

VII: Immanuel Kant von *G. Lehmann*. In Vorbereitung. (536)

VIII: Die Philosophie des 19. Jahrhunderts von *G. Lehmann*. 1. Teil. 151 Seiten. 1953. (571)

IX: Die Philosophie des 19. Jahrhunderts von *G. Lehmann*. 2. Teil. 168 Seiten. 1953. (709)

X: Die Philosophie im ersten Drittel des 20. Jahrhunderts 1. Teil von *G. Lehmann*. 128 Seiten. 1957. (845)

XI: Die Philosophie im ersten Drittel des 20. Jahrhunderts 2. Teil von *G. Lehmann*. 114 Seiten. 1960. (850)

**Die geistige Situation der Zeit** (1931) von *K. Jaspers*. 6. Abdruck der im Sommer 1932 bearbeiteten 5. Auflage. 211 Seiten. 1965. (1000)

**Erkenntnistheorie** von *G. Kropp*.
1. Teil: Allgemeine Grundlegung. 143 Seiten. 1950. (807)

**Formale Logik** von *P. Lorenzen*. 2., verbesserte Auflage. 165 Seiten. 1962. (1176/1176a)

**Philosophisches Wörterbuch** von *M. Apel* †. 5., völlig neubearbeitete Auflage von *P. Ludz*. 315 Seiten. 1958. (1031/1031a)

**Philosophische Anthropologie.** Menschliche Selbstdeutung in Geschichte und Gegenwart von *M. Landmann*. 2., durchgesehene Auflage. 223 Seiten. 1964. (156/156a)

## Pädagogik, Psychologie, Soziologie

**Geschichte der Pädagogik** von *Herm. Weimer*. 16. Auflage von *Heinz Weimer*. 184 Seiten. 1964. (145)

**Therapeutische Psychologie.** Ihr Weg durch die Psychoanalyse von *W. M. Kranefeldt*. Mit einer Einführung von *C. G. Jung*. 3. Auflage. 152 Seiten. 1956. (1034)

**Allgemeine Psychologie** von *Th. Erismann †*. 4 Bände.

I: Grundprobleme. 3. Auflage. 146 Seiten. 1965. (831)

II: Grundarten des psychischen Geschehens. 2., neubearbeitete Auflage. 248 Seiten. 1959. (832/832a)

III: Experimentelle Psychologie und ihre Grundlagen. 1. Teil. 2., neubearbeitete Auflage. 112 Seiten, 7 Abbildungen. 1962. (833)

IV: Experimentelle Psychologie und ihre Grundlagen. 2. Teil. 2., neubearbeitete Auflage. 199 Seiten, 20 Abbildungen. 1962. (834/834a)

**Soziologie.** Geschichte und Hauptprobleme von *L. von Wiese*. 7. Auflage. 176 Seiten. 1964. (101)

**Ideengeschichte der sozialen Bewegung des 19. und 20. Jh.** von *W. Hofmann*. 243 Seiten. 1962. (1205/1205a)

**Sozialpsychologie** von *P. R. Hofstätter*. 2. Auflage. 191 Seiten, 18 Abbildungen. 1964. (104/104a)

**Psychologie des Berufs- und Wirtschaftslebens** von *W. Moede †*. 190 Seiten, 48 Abbildungen. 1958. (851/851a)

**Industrie- und Betriebssoziologie** von *R. Dahrendorf*. 3. Auflage. 142 Seiten, 3 Figuren. 1965. (103)

**Wirtschaftssoziologie** von *F. Fürstenberg*. 122 Seiten. 1961. (1193)

**Einführung in die Sozialethik** von *H.-D. Wendland*. 144 Seiten. 1963. (1203)

## Religion

**Jesus** von *M. Dibelius †*. 3. Auflage, mit einem Nachtrag von *W. G. Kümmel*. 140 Seiten. 1960. (1130)

**Paulus** von *M. Dibelius †*. Nach dem Tode des Verfassers herausgegeben und zu Ende geführt von *W. G. Kümmel*. 3., durchgesehene Auflage. 156 Seiten. 1964. (1160)

**Luther** von *F. Lau*. 151 Seiten. 1959. (1187)

**Melanchthon** von *R. Stupperich*. 139 Seiten. 1960. (1190)

**Zwingli** von *F. Schmidt-Clausing*. 119 Seiten. 1965. (1219)

**Einführung in die Konfessionskunde der orthodoxen Kirchen** von *K. Onasch*. 291 Seiten. 1962. (1197/1197a)

**Geschichte des christlichen Gottesdienstes** von *W. Nagel*. 215 Seiten. 1962. (1202/1202a)

**Geschichte Israels.** Von den Anfängen bis zur Zerstörung des Tempels (70 n. Chr.) von *E. L. Ehrlich*. 158 Seiten, 1 Tafel. 1958. (231/231a)

**Römische Religionsgeschichte** von *F. Altheim*. 2 Bände. 2., umgearbeitete Auflage.

I: Grundlagen und Grundbegriffe. 116 Seiten. 1956. (1035)

II: Der geschichtliche Ablauf. 164 Seiten. 1956. (1052)

**Die Religion des Buddhismus** von *D. Schlingloff*. 2 Bände.
I: Der Heilsweg des Mönchtums. 122 Seiten, 11 Abbildungen, 1 Karte. 1962. (174)
II: Der Heilsweg für die Welt. 129 Seiten, 9 Abbildungen, 1 Karte. 1963. (770)

## Musik

**Musikästhetik** von *H. J. Moser*. 180 Seiten. Mit zahlreichen Notenbeispielen. 1953. (344)
**Systematische Modulation** von *R. Hernried*. 2. Auflage. 136 Seiten. Mit zahlreichen Notenbeispielen. 1950. (1094)
**Der polyphone Satz** von *E. Pepping*. 2 Bände.
I: Der cantus-firmus-Satz. 2. Auflage. 223 Seiten. Mit zahlreichen Notenbeispielen. 1950. (1148)
II: Übungen im doppelten Kontrapunkt und im Kanon. 137 Seiten. Mit zahlreichen Notenbeispielen. 1957. (1164/1164a)
**Allgemeine Musiklehre** von *H. J. Moser*. 2., durchgesehene Auflage. 155 Seiten. Mit zahlreichen Notenbeispielen. 1955. (220/220a)
**Harmonielehre** von *H. J. Moser*. 2 Bände.
I: 109 Seiten. Mit 120 Notenbeispielen. 1954. (809)
II: In Vorbereitung. (810)
**Die Musik des 19. Jahrhunderts** von *W. Oehlmann*. 180 Seiten. 1953. (170)
**Die Musik des 20. Jahrhunderts** von *W. Oehlmann*. 312 Seiten. 1961. (171/171a)
**Technik der deutschen Gesangskunst** von *H. J. Moser*. 3., durchgesehene und verbesserte Auflage. 144 Seiten, 5 Figuren sowie Tabellen und Notenbeispiele. 1954. (576/576a)
**Die Kunst des Dirigierens** von *H. W. von Waltershausen †*. 2., vermehrte Auflage. 138 Seiten. Mit 19 Notenbeispielen. 1954. (1147)
**Die Technik des Klavierspiels** aus dem Geiste des musikalischen Kunstwerkes von *K. Schubert †*. 3. Auflage. 110 Seiten. Mit Notenbeispielen. 1954. (1045)

## Kunst

**Stilkunde** von *H. Weigert*. 2 Bände. 3., durchgesehene und ergänzte Auflage.
I: Vorzeit, Antike, Mittelalter. 136 Seiten, 94 Abbildungen. 1958. (80)
II: Spätmittelalter und Neuzeit. 150 Seiten, 88 Abbildungen. 1958. (781)
**Archäologie** von *A. Rumpf*. 3 Bände.
I: Einleitung, historischer Überblick. 143 Seiten, 6 Abbildungen, 12 Tafeln. 1953. (538)
II: Die Archäologensprache. Die antiken Reproduktionen. 136 Seiten, 7 Abbildungen, 12 Tafeln. 1956. (539)
III: In Vorbereitung. (540)

## Geschichte

**Einführung in die Geschichtswissenschaft** von *P. Kirn*. 4., durchgesehene Auflage. 127 Seiten. 1963. (270)

**Einführung in die Zeitgeschichte** von *B. Scheurig*. 101 Seiten. 1962. (1204)

**Zeitrechnung der römischen Kaiserzeit, des Mittelalters und der Neuzeit für die Jahre 1—2000 n. Chr.** von *H. Lietzmann †*. 3. Auflage, durchgesehen von *K. Aland*. 130 Seiten. 1956. (1085)

**Kultur der Urzeit** von *F. Behn*. 3 Bände. 4. Auflage der Kultur der Urzeit Bd. 1—3 von *M. Hoernes*.

I: Die vormetallischen Kulturen. (Die Steinzeiten Europas. Gleichartige Kulturen in anderen Erdteilen.) 172 Seiten, 48 Abbildungen. 1950. (564)

II: Die älteren Metallkulturen. (Der Beginn der Metallbenutzung, Kupfer- und Bronzezeit in Europa, im Orient und in Amerika.) 160 Seiten, 67 Abbildungen. 1950. (565)

III: Die jüngeren Metallkulturen. (Das Eisen als Kulturmetall, Hallstatt-Latène-Kultur in Europa. Das erste Auftreten des Eisens in den anderen Weltteilen.) 149 Seiten, 60 Abbildungen. 1950. (566)

**Vorgeschichte Europas** von *F. Behn*. Völlig neue Bearbeitung der 7. Auflage der „Urgeschichte der Menschheit" von *M. Hoernes*. 125 Seiten, 47 Abbildungen. 1949. (42)

**Der Eintritt der Germanen in die Geschichte** von *J. Haller †*. 3. Auflage, durchgesehen von *H. Dannenbauer*. 120 Seiten, 6 Kartenskizzen. 1957. (1117)

**Von den Karolingern zu den Staufern.** Die altdeutsche Kaiserzeit (900—1250) von *J. Haller †*. 4., durchgesehene Auflage von *H. Dannenbauer*. 142 Seiten, 4 Karten. 1958. (1065)

**Von den Staufern zu den Habsburgern.** Auflösung des Reichs und Emporkommen der Landesstaaten (1250—1519) von *J. Haller †*. 2., durchgesehene Auflage von *H. Dannenbauer*. 118 Seiten, 6 Kartenskizzen. 1960. (1077)

**Deutsche Geschichte** im Zeitalter der Reformation, der Gegenreformation und des dreißigjährigen Krieges von *F. Hartung*. 2., durchgesehene Auflage. 128 Seiten. 1963. (1105)

**Deutsche Geschichte von 1648—1740.** Politischer und geistiger Wiederaufbau von *W. Treue*. 120 Seiten. 1956. (35)

**Deutsche Geschichte von 1713—1806.** Von der Schaffung des europäischen Gleichgewichts bis zu Napoleons Herrschaft von *W. Treue*. 168 Seiten. 1957. (39)

**Deutsche Geschichte von 1806—1890.** Vom Ende des alten bis zur Höhe des neuen Reiches von *W. Treue*. 128 Seiten. 1961. (893)

**Deutsche Geschichte von 1890 bis zur Gegenwart** von *W. Treue*. In Vorbereitung. (894)

**Quellenkunde der Deutschen Geschichte im Mittelalter** (bis zur Mitte des 15. Jahrhunderts) von *K. Jacob †*. 3 Bände.

I: Einleitung. Allgemeiner Teil. Die Zeit der Karolinger. 6. Auflage, bearbeitet von *H. Hohenleutner*. 127 Seiten. 1959. (279)

II: Die Kaiserzeit (911—1250). 5. Auflage, neubearbeitet von *H. Hohenleutner*. 141 Seiten. 1961. (280)

III: Das Spätmittelalter (vom Interregnum bis 1500). Herausgegeben von *F. Wedeen*. 152 Seiten. 1952. (284)

**Geschichte Englands** von *H. Preller*. 2 Bände.
I: bis 1815. 3., stark umgearbeitete Auflage. 135 Seiten, 7 Stammtafeln, 2 Karten. 1952. (375)
II: Von 1815 bis 1910. 2., völlig umgearbeitete Auflage. 118 Seiten, 1 Stammtafel, 7 Karten. 1954. (1088)

**Römische Geschichte** von *F. Altheim*. 4 Bände. 2., verbesserte Auflage.
I: Bis zur Schlacht bei Pydna (168 v.Chr.). 124 Seiten. 1956. (19)
II: Bis zur Schlacht bei Actium (31 v.Chr.). 129 Seiten. 1956. (677)
III: Bis zur Schlacht an der Milvischen Brücke (312 n.Chr.). 148 Seiten. 1958. (679)
IV: Bis zur Schlacht am Yarmuk (636 n.Chr.). In Vorbereitung. (684)

**Geschichte der Vereinigten Staaten von Amerika** von *O. Graf zu Stolberg-Wernigerode*. 192 Seiten, 10 Karten. 1956. (1051/1051a)

## Deutsche Sprache und Literatur

**Geschichte der Deutschen Sprache** von *H. Sperber*. 4. Auflage, besorgt von *W. Fleischhauer*. 128 Seiten. 1963. (915)

**Deutsches Rechtschreibungswörterbuch** von *M. Gottschald †*. 2., verbesserte Auflage. 219 Seiten. 1953. (200/200a)

**Deutsche Wortkunde.** Kulturgeschichte des deutschen Wortschatzes von *A. Schirmer*. 5. Auflage von *W. Mitzka*. 123 Seiten. 1965. (929)

**Deutsche Sprachlehre** von *W. Hofstaetter*. 10. Auflage. Völlige Umarbeitung der 8. Auflage. 150 Seiten. 1960. (20)

**Stimmkunde** für Beruf, Kunst und Heilzwecke von *H. Biehle*. 111 Seiten. 1955. (60)

**Redetechnik.** Einführung in die Rhetorik von *H. Biehle*. 2., erweiterte Auflage. 151 Seiten. 1961. (61)

**Sprechen und Sprachpflege** (Die Kunst des Sprechens) von *H. Feist*. 2., verbesserte Auflage. 99 Seiten, 25 Abbildungen. 1952. (1122)

**Deutsches Dichten und Denken von der germanischen bis zur staufischen Zeit** von *H. Naumann †*. (Deutsche Literaturgeschichte vom 5.—13. Jahrhundert.) 2., verbesserte Auflage. 166 Seiten. 1952. (1121)

**Deutsches Dichten und Denken vom Mittelalter zur Neuzeit** von *G. Müller* (1270 bis 1700). 3., durchgesehene Auflage. 159 Seiten. In Vorbereitung. (1086)

**Deutsches Dichten und Denken von der Aufklärung bis zum Realismus** (Deutsche Literaturgeschichte von 1700—1890) von *K. Viëtor †*. 3., durchgesehene Auflage. 159 Seiten. 1958. (1096)

**Deutsche Heldensage** von *H. Schneider*. 2. Auflage, bearbeitet von *R. Wisniewski*. 148 Seiten. 1964. (32)

**Der Nibelunge Nôt** in Auswahl mit kurzem Wörterbuch von *K. Langosch*. 10., durchgesehene Auflage. 164 Seiten. 1956. (1)

**Kudrun und Dietrich-Epen** in Auswahl mit Wörterbuch von *O. L. Jiriczek*. 6. Auflage, bearbeitet von *R. Wisniewski*. 173 Seiten. 1957. (10)

**Wolfram von Eschenbach. Parzival.** Eine Auswahl mit Anmerkungen und Wörterbuch von *H. Jantzen*. 2. Auflage, bearbeitet von *H. Kolb*. 128 Seiten. 1957. (921)

**Hartmann von Aue. Der arme Heinrich** nebst einer Auswahl aus der „Klage" dem „Gregorius" und den Liedern (mit einem Wörterverzeichnis) herausgegeben von *F. Maurer*. 96 Seiten. 1958. (18)
**Gottfried von Straßburg. Tristan und Isolde** in Auswahl herausgegeben von *F. Maurer*. 2. Auflage. 142 Seiten. 1965. (22)
**Die deutschen Personennamen** von *M. Gottschald †*. 2., verbesserte Auflage. 151 Seiten. 1955. (422)
**Althochdeutsches Elementarbuch.** Grammatik und Texte von *H. Naumann †* und *W. Betz*. 3., verbesserte und vermehrte Auflage. 183 Seiten. 1962. (1111/1111a)
**Mittelhochdeutsche Grammatik** von *H. de Boor* und *R. Wisniewski*. 4., verbesserte und ergänzte Auflage. 150 Seiten. 1965. (1108)

## Indogermanisch, Germanisch

**Indogermanische Sprachwissenschaft** von *H. Krahe*. 2 Bände. 4., überarbeitete Auflage.
I: Einleitung und Lautlehre. 110 Seiten. 1962. (59)
II: Formenlehre. 100 Seiten. 1963. (64)
**Sanskrit-Grammatik** von *M. Mayrhofer*. 2., völlig neu bearbeitete Auflage. 110 Seiten. 1965. (1158/1158a)
**Gotisches Elementarbuch.** Grammatik, Texte mit Übersetzung und Erläuterungen von *H. Hempel*. 3., umgearbeitete Auflage. 166 Seiten. 1962. (79/79a)
**Altnordisches Elementarbuch.** Schrift, Sprache, Texte mit Übersetzung und Wörterbuch von *F. Ranke*. 2., durchgesehene Auflage. 146 Seiten. 1949. (1115)
**Germanische Sprachwissenschaft** von *H. Krahe*. 2 Bände.
I: Einleitung und Lautlehre. 5., überarbeitete Auflage. 149 Seiten. 1963. (238)
II: Formenlehre. 5., verbesserte Auflage. 149 Seiten. 1965. (780)

## Englisch, Romanisch

**Altenglisches Elementarbuch.** Einführung, Grammatik, Texte mit Übersetzung und Wörterbuch von *M. Lehnert*. 6., verbesserte Auflage. 178 Seiten. 1965. (1125)
**Historische neuenglische Laut- und Formenlehre** von *E. Ekwall*. 4., durchgesehene Auflage. 150 Seiten. 1965. (735)
**Englische Phonetik** von *H. Mutschmann †*. 2. Auflage, bearbeitet von *G. Scherer*. 127 Seiten. 1963. (601)
**Englische Literaturgeschichte** von *F. Schubel*. 4 Bände.
I: Die alt- und mittelenglische Periode. 163 Seiten. 1954. (1114)
II: Von der Renaissance bis zur Aufklärung. 160 Seiten. 1956. (1116)
III: Romantik und Viktorianismus. 160 Seiten. 1960. (1124)
**Beowulf** von *M. Lehnert*. Eine Auswahl mit Einführung, teilweiser Übersetzung, Anmerkungen und etymologischem Wörterbuch. 3., verbesserte Auflage. 135 Seiten. 1959. (1135)
**Shakespeare** von *P. Meißner †*. 2. Auflage, neubearbeitet von *M. Lehnert*. 136 Seiten. 1954. (1142)

**Romanische Sprachwissenschaft** von *H. Lausberg*. 4 Bände.
I: Einleitung und Vokalismus. 2., durchgesehene Auflage. 211 Seiten. 1963. (128/128a)
II: Konsonantismus. 2. Auflage. In Vorbereitung. (250)
III: Formenlehre. 1. Teil. 99 Seiten. 1962. (1199)
III: Formenlehre. 2. Teil. S. 99—260. 1962. (1200/1200a)
IV: Wortlehre. In Vorbereitung. (1208)

## Griechisch, Lateinisch

**Griechische Sprachwissenschaft** von *W. Brandenstein*. 3 Bände.
I: Einleitung, Lautsystem, Etymologie. 160 Seiten. 1954. (117)
II: Wortbildung und Formenlehre. 192 Seiten. 1959. (118/118a)
III: Syntax. I. Einleitung. Die Flexibilien. 1965. Im Druck. (924)

**Geschichte der griechischen Sprache.** 2 Bände
I: Bis zum Ausgang der klassischen Zeit von *O. Hoffmann †*. 3. Auflage, bearbeitet von *A. Debrunner †*. 156 Seiten. 1953. (111)
II: Grundfragen und Grundzüge des nachklassischen Griechisch von *A. Debrunner †*. 144 Seiten. 1954. (114)

**Geschichte der griechischen Literatur** von *W. Nestle*. 2 Bände. 3. Auflage bearbeitet von *W. Liebich*.
I: 144 Seiten. 1961. (70)
II: 149 Seiten. 1963. (557)

**Grammatik der neugriechischen Volkssprache** von *J. Kalitsunakis*. 3., wesentlich erweiterte und verbesserte Auflage. 196 Seiten. 1963. (756/756a)

**Neugriechisch-deutsches Gesprächsbuch** von *J. Kalitsunakis*. 2. Auflage, bearbeitet von *A. Steinmetz*. 99 Seiten. 1960. (587)

**Geschichte der lateinischen Sprache** von *F. Stolz* und *A. Debrunner †*. 4. Auflage bearbeitet von *W. P. Schmid*. In Vorbereitung. (492)

**Geschichte der römischen Literatur** von *L. Bieler*. 2., verbesserte Auflage. 2 Bände.
I: Die Literatur der Republik. 160 Seiten. 1965. (52)
II: Die Literatur der Kaiserzeit. 133 Seiten. 1965. (866)

## Orientalistik, Slavische Sprachen

**Die Keilschrift** von *B. Meissner*. 3. Auflage, neubearbeitet von *K. Oberhuber*. In Vorbereitung (708)

**Die Hieroglyphen** von *A. Erman*. 3. Auflage, neu bearbeitet von *O. Krückmann*. 1965. In Vorbereitung. (608)

**Hebräische Grammatik** von *G. Beer †*. 2 Bände. Völlig neubearbeitet von *R. Meyer*.
I: Schrift-, Laut- und Formenlehre I. 3. Auflage. Etwa 224 Seiten. 1965. (763/763a)
II: Formenlehre II. Syntax und Flexionstabellen. 2. Auflage. 195 Seiten 1955. (764/764a)

**Hebräisches Textbuch** zu *G. Beer-R. Meyer*, Hebräische Grammatik von *R. Meyer*. 170 Seiten. 1960. (769/769a)

**Slavische Sprachwissenschaft** von *H. Bräuer*. 2 Bände.
I: Einleitung, Lautlehre. 221 Seiten. 1961. (1191/1191a)
**Russische Grammatik** von *E. Berneker †*. 6., verbesserte Auflage von *M. Vasmer †*. 155 Seiten. 1961. (66)
**Polnische Grammatik** von *N. Damerau*. 1965. Im Druck. (942)

## Erd- und Länderkunde, Kartographie

**Afrika** von *F. Jaeger*. Ein geographischer Überblick. 2 Bände. 3. Auflage.
I: Der Lebensraum. 179 Seiten, 18 Abbildungen. In Vorbereitung. (910)
II: Mensch und Kultur. 155 Seiten, 6 Abbildungen. In Vorbereitung. (911)
**Australien und Ozeanien** von *H. J. Krug*. 176 Seiten, 46 Skizzen. 1953. (319)
**Kartographie** von *V. Heissler*. 213 Seiten, 125 Abb., 8 Anlagen. 1962. (30/30a)

## Volkswirtschaft, Statistik, Publizistik

**Allgemeine Betriebswirtschaftslehre** von *K. Mellerowicz*. 4 Bände.
11. u. 12., durchgesehene Auflage.
I: 224 Seiten. 1964. (1008/1008a)
II: 188 Seiten. 1962. (1153/1153a)
III: 260 Seiten. 1963. (1154/1154a)
IV: 209 Seiten. 1963. (1186/1186a)
**Buchhaltung und Bilanz** von *E. Kosiol*. 170 Seiten. 1964. (1213/1213a)
**Geschichte der Volkswirtschaftslehre** von *S. Wendt*. 182 Seiten. 1961. (1194)
**Allgemeine Volkswirtschaftslehre** von *A. Paulsen*. 4 Bände.
I: Grundlegung, Wirtschaftskreislauf. 6. Auflage. 159 Seiten, 11 Abbildungen. 1965. (1169)
II: Haushalte, Unternehmungen, Marktformen. 6. Auflage. 172 Seiten, 31 Abbildungen. 1965. (1170)
III: Produktionsfaktoren. 4. Auflage. 198 Seiten. 24 Abbildungen. 1965. (1171)
IV: Gesamtbeschäftigung, Konjunkturen, Wachstum. 3., neubearbeitete und ergänzte Auflage. 189 Seiten. 1965. (1172)
**Allgemeine Volkswirtschaftspolitik** von *H. Ohm*. 2 Bände.
I: Systematisch-Theoretische Grundlegung. 2. Auflage. 1965. Im Druck. (1195)
II: Der volkswirtschaftliche Gesamtorganismus als Objekt der Wirtschaftspolitik. In Vorbereitung. (1196)
**Finanzwissenschaft** von *H. Kolms*. 4 Bände.
I: Grundlegung, Öffentliche Ausgaben. 2., verbesserte Auflage. 162 Seiten. 1963. (148)

II. Erwerbseinkünfte, Gebühren und Beiträge, Allgemeine Steuerlehre. 2., verbesserte Auflage. 150 Seiten. 1964. (391)
III. Besondere Steuerlehre. 178 Seiten. 178 Seiten. 1962. (776)
IV. Öffentlicher Kredit. Öffentlicher Haushalt. Finanzausgleich. 191 Seiten. 1964. (782/782a)

**Finanzmathematik** von *M. Nicolas*. 192 Seiten, 11 Tafeln, 8 Tabellen und 72 Beispiele. 1959. (1183/1183a)

**Industrie- und Betriebssoziologie** von *R. Dahrendorf*. 3. Auflage. 142 Seiten, 3 Figuren. 1965. (103)

**Wirtschaftssoziologie** von *F. Fürstenberg*. 122 Seiten. 1961. (1193)

**Psychologie des Berufs- und Wirtschaftslebens** von *W. Moede †*. 190 Seiten, 48 Abbildungen. 1958. (851/851a)

**Einführung in die Arbeitswissenschaft** von *H. H. Hilf*. 169 Seiten, 57 Abbildungen. 1964. (1212/1212a)

**Allgemeine Methodenlehre der Statistik** von *J. Pfanzagl*. 2 Bände. 2., neubearbeitete Auflage.
I: Elementare Methoden unter besonderer Berücksichtigung der Anwendungen in den Wirtschafts- und Sozialwissenschaften. 251 Seiten, 42 Abbildungen. 1964. (746/746a)
II: Höhere Methoden unter besonderer Berücksichtigung der Anwendungen in Naturwissenschaft, Medizin und Technik. 295 Seiten, 39 Abbildungen. 1965. (747/747a)

**Zeitungslehre** von *E. Dovifat*. 2 Bände. 4., neubearbeitete Auflage.
I: Theoretische und rechtliche Grundlagen — Nachricht und Meinung — Sprache und Form. 149 Seiten. 1962. (1039)
II: Redaktion — Die Sparten: Verlag und Vertrieb, Wirtschaft und Technik — Sicherung der öffentlichen Aufgabe. 168 Seiten. 1962. (1040)

# Naturwissenschaften

## Mathematik

**Geschichte der Mathematik** von *J. E. Hofmann*. 4 Bände.
I: Von den Anfängen bis zum Auftreten von Fermat und Descartes. 2., verbesserte und vermehrte Auflage. 251 Seiten. 1963. (226/226a)
II: Von Fermat und Descartes bis zur Erfindung des Calculus und bis zum Ausbau der neuen Methoden. 109 Seiten. 1957. (875)
III: Von den Auseinandersetzungen um den Calculus bis zur französischen Revolution. 107 Seiten. 1957. (882)
IV: Geschichte der Mathematik der neuesten Zeit von *N. Stuloff*. In Vorbereitung. (883)

**Mathematische Formelsammlung** von *F. O. Ringleb*. 8., erweiterte Auflage. 320 Seiten. 40 Figuren. 1965. (51/51a)

**Vierstellige Tafeln und Gegentafeln** für logarithmisches und trigonometrisches Rechnen in zwei Farben zusammengestellt von *H. Schubert* und *R. Haussner*. 3., neubearbeitete Auflage von *J. Erlebach*. 158 Seiten. 1960. (81)

**Fünfstellige Logarithmen** mit mehreren graphischen Rechentafeln und häufig vorkommenden Zahlenwerten von *A. Adler*. 4. Auflage, überarbeitet von *J. Erlebach*. 127 Seiten, 1 Tafel. 1962. (423)

**Arithmetik** von *P. B. Fischer †*. 3. Auflage von *H. Rohrbach*. 152 Seiten, 19 Abbildungen. 1958. (47)

**Höhere Algebra** von *H. Hasse*. 2 Bände.
I: Lineare Gleichungen. 5., neubearbeitete Auflage. 150 Seiten. 1963. (931)
II: Gleichungen höheren Grades. 4., durchgesehene Auflage. 158 Seiten, 5 Figuren. 1958. (932)

**Aufgabensammlung zur höheren Algebra** von *H. Hasse* und *W. Klobe*. 3., verbesserte Auflage. 183 Seiten. 1961. (1082)

**Elementare und klassische Algebra vom modernen Standpunkt** von *W. Krull*. 2 Bände.
I: 3., erweiterte Auflage. 148 Seiten. 1963. (930)
II: 132 Seiten. 1959. (933)

**Lineare Programmierung** von *H. Langen*. Etwa 200 Seiten. 1965. (1206/1206a)

**Algebraische Kurven und Flächen** von *W. Burau*. 2 Bände.
I: Algebraische Kurven der Ebene. 153 Seiten, 28 Abbildungen. 1962. (435)
II: Algebraische Flächen 3. Grades und Raumkurven 3. und 4. Grades. 162 Seiten, 17 Abbildungen. 1962. (436/436a)

**Einführung in die Zahlentheorie** von *A. Scholz †*. Überarbeitet und herausgegeben von *B. Schoeneberg*. 3. Auflage. 128 Seiten. 1961. (1131)

**Formale Logik** von *P. Lorenzen*. 2., verbesserte Auflage. 165 Seiten. 1962. (1176/1176a)

**Topologie** von *W. Franz*. 2 Bände.
I: Allgemeine Topologie. 2., verbesserte Auflage. 144 Seiten, 9 Figuren. 1965. (1181)
II: Algebraische Topologie. 153 Seiten. 1965. (1182/1182a)

**Elemente der Funktionentheorie** von *K. Knopp †*. 6. Auflage. 144 Seiten, 23 Figuren. 1963. (1109)

**Funktionentheorie** von *K. Knopp †*. 2 Bände. 11. Auflage.
I: Grundlagen der allgemeinen Theorie der analytischen Funktionen. 144 Seiten, 8 Figuren. 1965. (668)
II: Anwendungen und Weiterführung der allgemeinen Theorie. 130 Seiten, 7 Figuren. 1965. (703)

**Aufgabensammlung zur Funktionentheorie** von *K. Knopp †*. 2 Bände. 6. Auflage.
I: Aufgaben zur elementaren Funktionentheorie. 135 Seiten. 1962. (877)
II: Aufgaben zur höheren Funktionentheorie. 151 Seiten. 1964. (878)

**Differential- und Integralrechnung** von *M. Barner*. (Früher *Witting*). 4 Bände.
I: Grenzwertbegriff, Differentialrechnung. 2., durchgesehene Auflage. 176 Seiten, 39 Figuren. 1963. (86)

**Gewöhnliche Differentialgleichungen** von *G. Hoheisel*. 7., neubearbeitete und erweiterte Auflage. 128 Seiten. 1965. (920/920a)

**Partielle Differentialgleichungen** von *G. Hoheisel*. 4., durchgesehene Auflage. 128 Seiten. 1960. (1003)

**Aufgabensammlung zu den gewöhnlichen und partiellen Differentialgleichungen** von *G. Hoheisel*. 4., neubearbeitete Auflage. 153 Seiten. 1964. (1059/1059a)

**Integralgleichungen** von *G. Hoheisel*. 2., neubearbeitete und erweiterte Auflage. 112 Seiten. 1963. (1099)

**Mengenlehre** von *E. Kamke*. 5. Auflage. 194 Seiten, 6 Figuren. 1965. (999/999a)

**Gruppentheorie** von *L. Baumgartner*. 4., erweiterte Auflage. 190 Seiten, 3 Tafeln. 1964. (837/837a)

**Ebene und sphärische Trigonometrie** von *G. Hessenberg †*. 5. Auflage, durchgesehen von *H. Kneser*. 172 Seiten, 60 Figuren. 1957. (99)

**Darstellende Geometrie** von *W. Haack*. 3 Bände.
I: Die wichtigsten Darstellungsmethoden. Grund- und Aufriß ebenflächiger Körper. 4., durchgesehene und ergänzte Auflage. 113 Seiten, 120 Abbildungen. 1963. (142)
II: Körper mit krummen Begrenzungsflächen. Kotierte Projektionen. 4., durchgesehene Auflage. 129 Seiten, 86 Abbildungen. 1965. (143)
III: Axonometrie und Perspektive. 2., durchgesehene und ergänzte Auflage. 129 Seiten, 100 Abbildungen. 1962. (144)

**Analytische Geometrie** von *K. P. Grotemeyer*. 3., neubearbeitete Auflage. 218 Seiten, 73 Abbildungen. 1964. (65/65a)

**Nichteuklidische Geometrie.** Hyperbolische Geometrie der Ebene von *R. Baldus †*. 4. Auflage, bearbeitet und ergänzt von *F. Löbell*. 158 Seiten, 75 Figuren. 1964. (970/970a)

**Differentialgeometrie** von *K. Strubecker*. 3 Bände.
- I: Kurventheorie der Ebene und des Raumes. 2., erweiterte Auflage. 253 Seiten, 45 Figuren. 1964. (1113/1113a)
- II: Theorie der Flächenmetrik. 195 Seiten, 14 Figuren. 1958. (1179/1179a)
- III: Theorie der Flächenkrümmung. 254 Seiten, 38 Figuren. 1959. (1180/1180a)

**Variationsrechnung** von *L. Koschmieder*. 2 Bände. 2., neubearbeitete Auflage.
- I: Das freie und gebundene Extrem einfacher Grundintegrale. 128 Seiten, 23 Figuren. 1962. (1074)
- II: Anwendung klassischer Verfahren auf allgemeine Fragen des Extrems. — Neuere unmittelbare Verfahren. In Vorbereitung. (1075)

**Einführung in die konforme Abbildung** von *L. Bieberbach*. 5., erweiterte Auflage. 180 Seiten, 42 Figuren. 1956. (768/768a)

**Vektoren und Matrizen** von *S. Valentiner*. 3. Auflage. (10., erweiterte Auflage der „Vektoranalysis"). Mit Anhang: Aufgaben zur Vektorrechnung von *H. König*. 206 Seiten, 35 Figuren. 1963. (354/354a)

**Wahrscheinlichkeitstheorie und Grundzüge der Maßtheorie** von *H. Bauer*. 2 Bände.
- I: 154 Seiten. 1964. (1216/1216a)
- II: In Vorbereitung. (1217)

**Versicherungsmathematik** von *F. Böhm*. 2 Bände.
- I: Elemente der Versicherungsrechnung. 3., vermehrte und verbesserte Auflage. Durchgesehener Neudruck. 151 Seiten. 1953. (180)
- II: Lebensversicherungsmathematik. Einführung in die technischen Grundlagen der Sozialversicherung. 2., verbesserte und vermehrte Auflage. 205 Seiten. 1953. (917/917a)

**Finanzmathematik** von *M. Nicolas*. 192 Seiten, 11 Tafeln, 8 Tabellen und 72 Beispiele. 1959. (1183/1183a)

**Kinematik** von *H. R. Müller*. 171 Seiten, 75 Figuren. 1963. (584/584a)

## Physik

**Einführung in die theoretische Physik** von *W. Döring*. 5 Bände.
- I: Mechanik. 3., verbesserte Auflage. 125 Seiten, 23 Abbildungen. 1965. (76)
- II: Das elektromagnetische Feld. 2., verbesserte Auflage. 132 Seiten, 15 Abbildungen. 1962. (77)
- III: Optik. 2., verbesserte Auflage. 117 Seiten, 32 Abbildungen. 1963. (78)
- IV: Thermodynamik. 2., verbesserte Auflage. 107 Seiten, 9 Abbildungen. 1964. (374)
- V: Statistische Mechanik. 114 Seiten, 12 Abbildungen. 1957. (1017)

**Mechanik deformierbarer Körper** von *M. Päsler*. 199 Seiten, 48 Abbildungen. 1960. (1189/1189a)

**Atomphysik** von *K. Bechert, Ch. Gerthsen †* und *A. Flammersfeld*. 7 Bände. 4., durchgesehene Auflage.
- I: Allgemeine Grundlagen. 1. Teil von *A. Flammersfeld*. 124 Seiten, 35 Abbildungen. 1959. (1009)

II: Allgemeine Grundlagen. 2. Teil von *A. Flammersfeld*. 112 Seiten, 47 Abbildungen. 1963. (1033)
III: Theorie des Atombaus. 1. Teil von *K. Bechert*. 148 Seiten, 16 Abbildungen. 1963. (1123/1123a)
IV: Theorie des Atombaus. 2. Teil von *K. Bechert*. 170 Seiten, 14 Abbildungen. 1963. (1165/1165a)

**Differentialgleichungen der Physik** von *F. Sauter*. 3., durchgesehene und ergänzte Auflage. 148 Seiten, 16 Figuren. 1958. (1070)

**Physikalische Formelsammlung** von *G. Mahler†*. Fortgeführt von *K. Mahler*. Neubearbeitet von *H. Graewe*. 11. Auflage. 167 Seiten, 69 Figuren. 1963. (136)

**Physikalische Aufgabensammlung** mit Ergebnissen von *G. Mahler †*. Fortgeführt von *K. Mahler*. Neubearbeitet von *H. Graewe*. 12. Auflage. 141 Seiten. 1964. (243)

## Chemie

**Geschichte der Chemie** in kurzgefaßter Darstellung von *G. Lockemann*. 2 Bände.
I: Vom Altertum bis zur Entdeckung des Sauerstoffs. 2. Auflage. 142 Seiten, 8 Bildnisse. In Vorbereitung (264)
II: Von der Entdeckung des Sauerstoffs bis zur Gegenwart. 151 Seiten, 16 Bildnisse. 1955. (265/265a)

**Anorganische Chemie** von *W. Klemm*. 13. Auflage. 255 Seiten, 34 Abbildungen. 1964. (37/37a)

**Organische Chemie** von *W. Schlenk*. 9., erweiterte Auflage. 273 Seiten, 16 Abbildungen. 1963. (38/38a)

**Physikalische Methoden in der Organischen Chemie** von *G. Kresze*. 2 Bände.
I: 119 Seiten, 65 Abbildungen. 1962. (44)
II: 164 Seiten. 1962. (45/45a)

**Allgemeine und physikalische Chemie** von *W. Schulze*. 2 Bände.
I: 6., verbesserte Auflage. 139 Seiten, 10 Figuren. 1964. (71)
II: 5., verbesserte Auflage. 178 Seiten, 37 Figuren. 1961. (698/698a)

**Molekülbau** Theoretische Grundlagen und Methoden der Strukturermittlung von *W. Schulze*. 123 Seiten, 43 Figuren. 1958. (786)

**Einfache Versuche zur allgemeinen und physikalischen Chemie** von *E. Dehn*. 371 Versuche mit 40 Abbildungen. 272 Seiten. 1962. (1201/1201a)

**Physikalisch-chemische Rechenaufgaben** von *E. Asmus*. 3., verbesserte Auflage. 96 Seiten. 1958. (445)

**Maßanalyse.** Theorie und Praxis der klassischen und der elektrochemischen Titrierverfahren von *G. Jander* und *K. F. Jahr*. 10., erweiterte Auflage, mitbearbeitet von *H. Knoll*. 358 Seiten, 56 Figuren. 1963. (221/221a)

**Qualitative Analyse** von *H. Hofmann* u. *G. Jander*. 2., durchgesehene und verbesserte Auflage. 308 Seiten, 5 Abbildungen. 1963. (247/247a)

**Stöchiometrische Aufgabensammlung** von *W. Bahrdt* † und *R. Scheer*. Mit den Ergebnissen. 8., durchgesehene Auflage. 119 Seiten. 1964. (452)

**Elektrochemie** von *K. Vetter*. 2 Bände.
I: In Vorbereitung. (252)
II: In Vorbereitung. (253)

**Kristallchemie** von *J. Zemann*. 1965. In Vorbereitung. (1220)

## Technologie

**Die Chemie der Kunststoffe** von *K. Hamann*, unter Mitarbeit von *W. Funke* und *H. D. Hermann*. 143 Seiten. 1960. (1173)

**Warenkunde** von *K. Hassak* und *E. Beutel* †. 2 Bände.
I: Anorganische Waren sowie Kohle und Erdöl. 8. Auflage. Neubearbeitet von *A. Kutzelnigg*. 119 Seiten, 18 Figuren. 1958. (222)
II: Organische Waren. 8. Auflage. Vollständig neubearbeitet von *A. Kutzelnigg*. 157 Seiten, 32 Figuren. 1959. (223)

**Die Fette und Öle** von *Th. Klug*. 6., verbesserte Auflage. 143 Seiten. 1961. (335)

**Die Seifenfabrikation** von *K. Braun* †. 3., neubearbeitete und verbesserte Auflage von *Th. Klug*. 116 Seiten, 18 Abbildungen. 1953. (336)

**Thermische Verfahrenstechnik** von *H. Bock*. 3 Bände.
I: Eigenschaften und Verhalten der realen Stoffe. 164 Seiten, 28 Abbildungen. 1963. (1209/1209a)
II: Funktion und Berechnung der elementaren Geräte. 195 Seiten, 54 Abbildungen. 1964. (1210/1210a)
III: Fließbilder, ihre Funktion und ihr Zusammenbau aus Geräten. 224 Seiten, 67 Abbildungen. 1965. (1211/1211a)

**Textilindustrie** von *A. Blümcke*.
I: Spinnerei und Zwirnerei. 111 Seiten, 43 Abbildungen. 1954. (184)

## Biologie

**Einführung in die allgemeine Biologie** und ihre philosophischen Grund- und Grenzfragen von *M. Hartmann*. 2. Auflage. 132 Seiten, 2 Abbildungen. 1965. (96)

**Hormone** von *G. Koller*. 2., neubearbeitete und erweiterte Auflage. 187 Seiten, 60 Abbildungen, 19 Tabellen. 1949. (1141)

**Fortpflanzung im Tier- und Pflanzenreich** von *J. Hämmerling*. 2., ergänzte Auflage. 135 Seiten, 101 Abbildungen. 1951. (1138)

**Geschlecht und Geschlechtsbestimmung im Tier- und Pflanzenreich** von *M. Hartmann*. 2., verbesserte Auflage. 116 Seiten, 61 Abbildungen, 7 Tabellen. 1951. (1127)

**Symbiose der Tiere mit pflanzlichen Mikroorganismen** von *P. Buchner*. 2. verbesserte und vermehrte Auflage. 130 Seiten, 121 Abbildungen. 1949. (1128)

**Grundriß der Allgemeinen Mikrobiologie** von *W. u. A. Schwartz*. 2 Bände. 2., verbesserte und ergänzte Auflage.
I: 147 Seiten, 25 Abbildungen. 1960. (1155)
II: 142 Seiten, 29 Abbildungen. 1961. (1157)

## Botanik

**Entwicklungsgeschichte des Pflanzenreiches** von *H. Heil*. 2. Auflage. 138 Seiten, 94 Abbildungen, 1 Tabelle. 1950. (1137)

**Morphologie der Pflanzen** von *L. Geitler*. 3., umgearbeitete Auflage. 126 Seiten, 114 Abbildungen. 1953. (141)

**Pflanzengeographie** von *L. Diels †*. 5., völlig neubearbeitete Auflage von *F. Mattick*. 195 Seiten, 2 Karten. 1958. (389/389a)

**Die Laubhölzer.** Kurzgefaßte Beschreibung der in Mitteleuropa gedeihenden Laubbäume und Sträucher von *F. W. Neger †* und *E. Münch †*. 3., durchgesehene Auflage, herausgegeben von *B. Huber*. 143 Seiten, 63 Figuren, 7 Tabellen. 1950. (718)

**Die Nadelhölzer (Koniferen) und übrigen Gymnospermen** von *F. W. Neger †* und *E. Münch †* 4. Auflage, durchgesehen und ergänzt von *B. Huber*. 140 Seiten, 75 Figuren, 4 Tabellen, 3 Karten. 1952. (355)

**Pflanzenzüchtung** von *H. Kuckuck*. 2 Bände.

I: Grundzüge der Pflanzenzüchtung. 3., völlig umgearbeitete und erweiterte Auflage. 132 Seiten, 22 Abbildungen. 1952. (1134)

II: Spezielle gartenbauliche Pflanzenzüchtung (Züchtung von Gemüse, Obst und Blumen). 178 Seiten, 27 Abbildungen. 1957. (1178/1178a)

## Zoologie

**Entwicklungsphysiologie der Tiere** von *F. Seidel*. 2 Bände.

I: Ei und Furchung. 2. Auflage. In Vorbereitung. (1162)

II: Körpergrundgestalt und Organbildung. 2. Auflage. In Vorbereitung. (1163)

**Vergleichende Physiologie der Tiere** von *K. Herter*. 2 Bände. 4. Auflage.

I: Stoff- und Energiewechsel. Neu bearbeitet von *K. Urich*. 1965. Im Druck. (972)

II: Bewegung und Reizerscheinungen. Neu bearbeitet von *G. Birukow*. In Vorbereitung. (973)

**Das Tierreich**

I: Einzeller, Protozoen von *E. Reichenow*. 115 Seiten. 59 Abbildungen. 1956. (444)

II: Schwämme und Hohltiere von *H. J. Hannemann*. 95 Seiten, 80 Abbildungen. 1956. (442)

III: Würmer. Platt-, Hohl-, Schnurwürmer, Kamptozoen, Ringelwürmer, Protracheaten, Bärtierchen, Zungenwürmer von *S. Jaeckel*. 114 Seiten, 36 Abbildungen. 1955. (439)

IV, 1: Krebse von *H. E. Gruner* und *K. Deckert*. 114 Seiten, 43 Abbildungen. 1956. (443)

IV, 2: Spinnentiere (Trilobitomorphen, Fühlerlose) und Tausendfüßler von *A. Kaestner*. 96 Seiten, 55 Abbildungen. 1955. (1161)

IV, 3: Insekten von *H. von Lengerken*. 2. Auflage. In Vorbereitung. (594)

V: Weichtiere. Urmollusken, Schnecken, Muscheln und Kopffüßer von *S. Jaeckel*. 92 Seiten. 34 Figuren. 1954. (440)

VI: Stachelhäuter. Tentakulaten, Binnenatmer und Pfeilwürmer von *S. Jaeckel*. 100 Seiten, 46 Abbildungen. 1955. (441)
VII, 1: Manteltiere, Schädellose, Rundmäuler von *Th. Haltenorth*. In Vorbereitung. (448)
VII, 2: Fische von *D. Lüdemann*. 130 Seiten, 65 Abbildungen. 1955. (356)
VII, 3: Lurche (Chordatiere) von *K. Herter*. 143 Seiten, 129 Abbildungen. 1955. (847)
VII, 4: Kriechtiere (Chordatiere) von *K. Herter*. 200 Seiten, 42 Abbildungen. 1960. (447/447a)
VII, 5: Vögel (Chordatiere) von *H.-A. Freye*. 156 Seiten, 69 Figuren. 1960. (869)
VII, 6: Säugetiere (Chordatiere) von *Th. Haltenorth*. In Vorbereitung. (282)

## Land- und Forstwirtschaft

**Landwirtschaftliche Tierzucht.** Die Züchtung und Haltung der landwirtschaftlichen Nutztiere von *H. Vogel*. 139 Seiten, 11 Abbildungen. 1952. (228)
**Kulturtechnische Bodenverbesserungen** von *O. Fauser*. 2 Bände. 5., verbesserte und vermehrte Auflage.
I: Allgemeines, Entwässerung. 127 Seiten, 49 Abbildungen. 1959. (691)
II: Bewässerung, Ödlandkultur, Flurbereinigung. 159 Seiten, 71 Abbildungen. 1961. (692)
**Agrikulturchemie** von *K. Scharrer*. 2 Bände.
I: Pflanzenernährung. 143 Seiten. 1953. (329)
II: Futtermittelkunde. 192 Seiten. 1956. (330/330a)

## Geologie, Mineralogie, Kristallographie

**Geologie** von *F. Lotze*. 3., verbesserte Auflage. 178 Seiten, 80 Abbildungen. 1965. (13/13a)
**Mineral- und Erzlagerstättenkunde** von *H. Huttenlocher †*. 2 Bände. 2. Auflage. Neubearbeitet von *P. Ramdohr*.
I: 128 Seiten, 34 Abbildungen. 1965. Im Druck. (1014)
II: 156 Seiten, 48 Abbildungen. 1965. Im Druck. (1015/1015a)
**Allgemeine Mineralogie.** 11., erweiterte Auflage der „Mineralogie" von *R. Brauns †*, neubearbeitet von *K. F. Chudoba*. 152 Seiten, 143 Textfiguren, 1 Tafel 3 Tabellen. 1963. (29/29a)
**Spezielle Mineralogie.** 11., erweiterte Auflage der „Mineralogie" von *R. Brauns †*, bearbeitet von *K. F. Chudoba*. 193 Seiten, 127 Textfiguren, 6 Tabellen. 1964. (31/31a)
**Petrographie** (Gesteinskunde) von *W. Bruhns †*. Neubearbeitet von *P. Ramdohr*. 5., erweiterte Auflage. 141 Seiten, 10 Figuren. 1960. (173)
**Kristallchemie** von *J. Zemann*. 1965. In Vorbereitung. (1220)

**Kristallographie** von *W. Bruhns †*. 6. Auflage, neubearbeitet von *P. Ramdohr*. 109 Seiten, 165 Abbildungen. 1965. (210)

**Einführung in die Kristalloptik** von *E. Buchwald*. 5., verbesserte Auflage. 128 Seiten, 117 Figuren. 1963. (619/619a)

**Lötrohrprobierkunde.** Mineraldiagnose mit Lötrohr und Tüpfelreaktion von *M. Henglein*. 4., durchgesehene und erweiterte Auflage. 108 Seiten, 12 Figuren. 1962. (483)

# Technik

**Graphische Darstellung in Wissenschaft und Technik** von *M. Pirani*. 3., erweiterte Auflage bearbeitet von *J. Fischer* unter Benutzung der von *I. Runge* besorgten 2. Auflage. 216 Seiten, 104 Abbildungen. 1957. (728/728a)

**Technische Tabellen und Formeln** von *W. Müller*. 5., verbesserte und erweiterte Auflage von *E. Schulze*. 165 Seiten, 114 Abbildungen, 99 Tafeln. 1962. (579)

**Einführung in die Arbeitswissenschaft** von *H. H. Hilf*. 164 Seiten, 57 Abbildungen. 1964. (1212/1212a)

**Grundlagen der Straßenverkehrstechnik.** Theorie der Leistungsfähigkeit von *E. Engel*. 101 Seiten, 55 Abbildungen. 1962. (1198)

## Elektrotechnik

**Grundlagen der allgemeinen Elektrotechnik** von *O. Mohr*. 2., durchgesehene Auflage. 260 Seiten, 136 Bilder, 14 Tafeln. 1961. (196/196a)

**Die Gleichstrommaschine** von *K. Humburg*. 2 Bände. 2., durchgesehene Auflage.

I: 102 Seiten, 59 Abbildungen. 1956. (257)

II: 101 Seiten, 38 Abbildungen. 1956. (881)

**Die Synchronmaschine** von *W. Putz*. 92 Seiten, 64 Bilder. 1962. (1146)

**Induktionsmaschinen** von *F. Unger*. 2., erweiterte Auflage. 142 Seiten, 49 Abbildungen. 1954. (1140)

**Die komplexe Berechnung von Wechselstromschaltungen** von *H. H. Meinke*. 3., neubearbeitete Auflage. 185 Seiten, 126 Abbildungen. 1965. (1156/1156a)

**Theoretische Grundlagen zur Berechnung der Schaltgeräte** von *F. Kesselring*. 4. Auflage. In Vorbereitung. (711)

**Einführung in die Technik selbsttätiger Regelungen** von *W. zur Megede*. 2., durchgesehene Auflage. 180 Seiten, 86 Abbildungen. 1961. (714/714a)

**Elektromotorische Antriebe** (Grundlagen für die Berechnung) von *A. Schwaiger*. 4., neubearbeitete Auflage. In Vorbereitung. (827)

**Überspannungen und Überspannungsschutz** von *G. Frühauf*. Durchgesehener Neudruck. 122 Seiten, 98 Abbildungen. 1950. (1132)

**Elektrische Höchstspannungs-Schaltanlagen. Für Freiluft und Innenanordnung** von *G. Meiners* und *K.-H. Wiesenewsky*. 138 Seiten 58 Abbildungen. 1964. (796/796a)

**Transformatoren** von *W. Schäfer*. 4., überarbeitete und ergänzte Auflage. 130 Seiten, 73 Abbildungen. 1962. (952)

## Maschinenbau

**Metallkunde** von *H. Borchers*. 3 Bände.

I: Aufbau der Metalle und Legierungen. 6. Auflage. 120 Seiten, 90 Abbildungen, 2 Tabellen. 1964. (432)

II: Eigenschaften, Grundzüge der Form- und Zustandsgebung. 5., ergänzte und durchgesehene Auflage. 182 Seiten, 107 Abbildungen, 10 Tabellen. 1963. (433/433a)
III: Die metallkundlichen Untersuchungsmethoden von *E. Hanke*. Im Druck. (434)

**Die Werkstoffe des Maschinenbaues** von *A. Thum* † und *C. M. v. Meysenbug*. 2 Bände.
I: Einführung in die Werkstoffprüfung. 2., neubearbeitete Auflage. 100 Seiten, 7 Tabellen, 56 Abbildungen. 1956. (476)
II: Die Konstruktionswerkstoffe. 132 Seiten, 40 Abbildungen. 1959. (936)

**Dynamik** von *W. Müller*. 2 Bände. 2., verbesserte Auflage.
I: Dynamik des Einzelkörpers. 128 Seiten, 48 Figuren. 1952. (902)
II: Systeme von starren Körpern. 102 Seiten, 41 Figuren. 1952. (903)

**Technische Schwingungslehre** von *L. Zipperer*. 2 Bände. 2., neubearbeitete Auflage.
I: Allgemeine Schwingungsgleichungen, einfache Schwinger. 120 Seiten, 101 Abbildungen. 1953. (953)
II: Torsionsschwingungen in Maschinenanlagen. 102 Seiten 59 Abbildungen. 1955. (961/961a)

**Werkzeugmaschinen für Metallbearbeitung** von *K. P. Matthes*. 2 Bände.
I: 100 Seiten 27 Abbildungen, 11 Zahlentafeln, 1 Tafelanhang. 1954. (561)
II: Fertigungstechnische Grundlagen der neuzeitlichen Metallbearbeitung. 101 Seiten, 30 Abbildungen, 5 Tafeln. 1955. (562)

**Das Maschinenzeichnen mit Einführung in das Konstruieren** von *W. Tochtermann*. 2 Bände. 4. Auflage.
I: Das Maschinenzeichnen. 156 Seiten, 75 Tafeln. 1950. (589)
II: Ausgeführte Konstruktionsbeispiele. 130 Seiten, 58 Tafeln. 1950. (590)

**Die Maschinenelemente** von *E. A. vom Ende* †. 4., überarbeitete Auflage. 184 Seiten, 179 Figuren, 11 Tafeln. 1963. (3/3a)

**Die Maschinen der Eisenhüttenwerke** von *L. Engel*. 156 Seiten, 95 Abbildungen. 1957. (583/583a)

**Walzwerke** von *H. Sedlaczek* † unter Mitarbeit von *F. Fischer* und *M. Buch*. 232 Seiten, 157 Abbildungen. 1958. (580/580a)

**Getriebelehre** von *P. Grodzinski* †. 2 Bände. 3., neubearbeitete Auflage von *G. Lechner*.
I: Geometrische Grundlagen. 164 Seiten, 131 Figuren. 1960. (1061)
II: Angewandte Getriebelehre. In Vorbereitung. (1062)

**Kinematik** von *H. R. Müller*. 171 Seiten, 75 Figuren. 1963. (584/584a)

**Gießereitechnik** von *H. Jungbluth*. 2 Bände.
I: Eisengießerei. 126 Seiten, 44 Abbildungen. 1951. (1159)

**Die Dampfkessel** einschließlich Feuerungen und Hilfseinrichtungen. Physikalische und chemische Grundlagen, Berechnung und Konstruktion, Vorschriften und Beispiele von *W. Marcard*. 3., neubearbeitete Auflage von *G. Beyer*. 2 Bände.
I: Physikalische und chemische Grundlagen, Wärmelehre, Wärmeübertragung, Verbrennung. 133 Seiten, 35 Bilder, 26 Tabellen. 1964. (9/9a)

**Die Dampfturbinen.** Ihre Wirkungsweise, Berechnung und Konstruktion von *C. Zietemann*. 3 Bände.
I: Theorie der Dampfturbinen. 4. Auflage. 139 Seiten, 48 Abbildungen. 1964. In Vorbereitung. (274)
II: Die Berechnung der Dampfturbinen und die Konstruktion der Einzelteile. 4., verbesserte Auflage. 132 Seiten, 111 Abbildungen. 1964. In Vorbereitung. (715)
III: Die Regelung der Dampfturbinen, die Bauarten, Turbinen für Sonderzwecke, Kondensationsanlagen. 3., verbesserte Auflage. 126 Seiten, 90 Abbildungen. 1956. (716)

**Verbrennungsmotoren** von *W. Endres*. 3 Bände.
I: Überblick. Motor-Brennstoffe. Verbrennung im Motor allgemein, im Otto- und Diesel-Motor. 153 Seiten, 57 Abbildungen. 1958. (1076/1076a)
II: Die heutigen Typen der Verbrennungskraftmaschine. In Vorbereitung. (1184)
III: Die Einzelteile des Verbrennungsmotors. In Vorbereitung. (1185)

**Autogenes Schweißen und Schneiden** von *H. Niese*. 5. Auflage, neubearbeitet von *A. Küchler*. 136 Seiten, 71 Figuren. 1953. (499)

**Die elektrischen Schweißverfahren** von *H. Niese*. 2. Auflage, neubearbeitet von *H. Dienst*. 136 Seiten, 58 Abbildungen. 1955. (1020)

**Die Hebezeuge.** Entwurf von Winden und Kranen von *G. Tafel*. 2., verbesserte Auflage. 176 Seiten. 230 Figuren. 1954. (414/414a)

## Vermessungswesen

**Vermessungskunde** von *W. Großmann*. 3 Bände.
I: Stückvermessung und Nivellieren. 12., verbesserte Auflage. 144 Seiten, 117 Figuren. 1965. Im Druck. (468)
II: Horizontalaufnahmen und ebene Rechnungen. 9., verbesserte Auflage. 136 Seiten, 101 Figuren. 1963. (469)
III: Trigonometrische und barometrische Höhenmessung. Tachymetrie und Absteckungen. 8., verbesserte Auflage. 140 Seiten, 102 Figuren. 1965. (862)

**Kartographie** von *V. Heissler*. 213 Seiten, 125 Abbildungen, 8 Anlagen. 1962. (30/30a)

**Photogrammetrie** von *G. Lehmann*. 1965. In Vorbereitung. (1188/1188a)

## Wasserbau

**Wasserkraftanlagen** von *A. Ludin* unter Mitarbeit von *W. Borkenstein*. 2 Bände.
I: Planung, Grundlagen und Grundzüge. 124 Seiten, 60 Abbildungen. 1955. (665)
II: Anordnung und Ausbildung der Hauptbauwerke. 184 Seiten, 91 Abbildungen. 1958. (666/666a)

**Verkehrswasserbau** von *H. Dehnert*. 3 Bände.
I: Entwurfsgrundlagen, Flußregelungen. 103 Seiten, 53 Abbildungen. 1950. (585)
II: Flußkanalisierung und Schiffahrtskanäle. 94 Seiten, 60 Abbildungen. 1950. (597)
III: Schleusen und Hebewerke. 98 Seiten, 70 Abbildungen. 1950. (1152)

**Wehr- und Stauanlagen** von *H. Dehnert*. 134 Seiten, 90 Abbildungen. 1952. (965)

**Talsperren** von *F. Tölke*. 122 Seiten, 70 Abbildungen. 1953. (1044)

## Hoch- und Tiefbau

**Die wichtigsten Baustoffe des Hoch- und Tiefbaus** von *O. Graf †*. 4., verbesserte Auflage. 131 Seiten, 63 Abbildungen. 1953. (984)

**Baustoffverarbeitung und Baustellenprüfung des Betons** von *A. Kleinlogel*. 2., neubearbeitete und erweiterte Auflage. 126 Seiten, 35 Abbildungen. 1951. (978)

**Festigkeitslehre.** 2 Bände.
I: Elastizität, Plastizität und Festigkeit der Baustoffe und Bauteile von *W. Gehler †* und *W. Herberg*. Durchgesehener und erweiterter Neudruck. 159 Seiten, 118 Abbildungen. 1952. (1144)
II: Formänderung, Platten, Stabilität und Bruchhypothesen von *W. Herberg* und *N. Dimitrov*. 187 Seiten, 94 Abbildungen. 1955. (1145/1145a)

**Grundlagen des Stahlbetonbaus** von *A. Troche*. 2., neubearbeitete und erweiterte Auflage. 208 Seiten, 75 Abbildungen, 17 Bemessungstafeln, 20 Rechenbeispiele. 1953. (1078)

**Statik der Baukonstruktionen** von *A. Teichmann*. 3 Bände.
I: Grundlagen. 101 Seiten, 51 Abbildungen, 8 Formeltafeln. 1956. (119)
II: Statisch bestimmte Stabwerke. 107 Seiten, 52 Abbildungen, 7 Tafeln. 1957. (120)
III: Statisch unbestimmte Systeme. 112 Seiten, 34 Abbildungen, 7 Formeltafeln. 1958. (122)

**Fenster, Türen, Tore** aus Holz und Metall. Eine Anleitung zu ihrer guten Gestaltung, wirtschaftlichen Bemessung und handwerksgerechten Konstruktion von *W. Wickop †*. 4., überarbeitete und ergänzte Auflage. 155 Seiten, 95 Abbildungen. 1955. (1092)

**Heizung und Lüftung** von *W. Körting*. 2 Bände. 9., neubearbeitete Auflage.
I: Das Wesen und die Berechnung der Heizungs- und Lüftungsanlagen. 171 Seiten, 29 Abbildungen, 36 Zahlentafeln. 1962. (342/342a)
II: Die Ausführung der Heizungs- und Lüftungsanlagen. 1965. In Vorbereitung. (343)

**Industrielle Kraft- und Wärmewirtschaft** von *F. A. F. Schmidt* und *A. Beckers*. 167 Seiten, 73 Abbildungen. 1957. (318/318a)

## Sammlung Göschen / Bandnummernfolge

1 Langosch, Der Nibelunge Nôt
3/3a v. Ende, Maschinenelemente
9/9a Marcard-Beyer, Dampfkessel I
10 Jiriczek-Wisniewski, Kudrun und Dietrich-Epen
13/13a Lotze, Geologie
18 Maurer, Hartmann von Aue. Der arme Heinrich
19 Altheim, Römische Geschichte I
20 Hofstaetter, Dt. Sprachlehre
22 Maurer, Gottfried von Strassburg
29/29a Brauns-Chudoba, Allgemeine Mineralogie
30/30a Heissler, Kartographie
31/31a Brauns-Chudoba, Spezielle Mineralogie
32 Schneider-Wisniewski, Deutsche Heldensage
35 Treue, Dt. Geschichte von 1648—1740
37/37a Klemm, Anorganische Chemie
38/38a Schlenk, Organische Chemie
39 Treue, Dt. Geschichte von 1713—1806
42 Behn-Hoernes, Vorgeschichte Europas
44 Kresze, Physikalische Methoden in der Organischen Chemie I
45/45a Kresze, Physikalische Methoden in der Organischen Chemie II
47 Fischer-Rohrbach, Arithmetik
51/51a Ringleb, Mathem. Formelsammlung
52 Bieler, Röm. Literaturgesch. I
59 Krahe, Indog. Sprachwiss. I
60 Biehle, Stimmkunde
61 Biele, Redetechnik
64 Krahe, Indog. Sprachwiss. II
65/65a Grotemeyer, Analyt. Geometrie
66 Berneker-Vasmer, Russische Grammatik
70 Nestle-Liebich, Gesch. d. griechischen Literatur I
71 Schulze, Allgemeine und physikalische Chemie I
76 Döring Einf. i. d. th. Physik I
77 Döring, Einf. i. d. th. Physik II
78 Döring, Einf. i. d. th. Physik III
79/79a Hempel, Got. Elementarbuch
80 Weigert, Stilkunde I
81 Schubert-Haussner-Erlebach, Vierstell. Logarithmentafeln
86 Barner, Differential- u. Integralrechnung I
96 Hartmann, Einf. in die allgem. Biologie
99 Hessenberg-Kneser, Ebene und sphär. Trigonometrie
101 v. Wiese Soziologie
103 Dahrendorf, Industrie- und Betriebssoziologie
104/104a Hofstätter, Sozialpsychologie
111 Hoffmann-Debrunner, Gesch. der griechischen Sprache I
114 Debrunner, Gesch. der griechischen Sprache II
117 Brandenstein, Griechische Sprachwissenschaft I
118/118a Brandenstein, Griechische Sprachwissenschaft II
119 Teichmann, Statik der Baukonstruktionen I
120 Teichmann, Statik der Baukonstruktionen II
122 Teichmann, Statik der Baukonstruktionen III

128/128a Lausberg, Romanische Sprachwissenschaft I
136 Mahler-Graewe, Physikal. Formelsammlung
141 Geitler, Morphologie der Pflanzen
142 Haack, Darst. Geometrie I
143 Haack, Darst. Geometrie II
144 Haack, Darst. Geometrie III
145 Weimer, Gesch. der Pädagogik
148 Kolms, Finanzwissenschaft I
156/156a Landmann, Philosophische Anthropologie
170 Oehlmann, Musik des 19. Jhs.
171/171a Oehlmann, Musik des 20. Jhs.
173 Bruhns-Ramdohr, Petrographie
174 Schlingloff, Religion des Buddhismus I
180 Böhm, Versicherungsmathematik I
184 Blümcke, Textilindustrie I
196/196a Mohr, Grundlagen der allgem. Elektrotechnik
200/200a Gottschald, Dt. Rechtschreibungswörterbuch
210 Bruhns-Ramdohr, Kristallographie
220/220a Moser, Allg. Musiklehre
221/221a Jander-Jahr-Knoll, Maßanalyse
222 Hassak-Beutel-Kutzelnigg, Warenkunde I
223 Hassak-Beutel-Kutzelnigg, Warenkunde II
226/226a Hofmann, Gesch. der Mathematik I
228 Vogel, Landw. Tierzucht
231/231a Ehrlich, Gesch. Israels
238 Krahe, Germ. Sprachwiss. I
243 Mahler-Graewe, Physikal. Aufgabensammlung
247/247a Hofmann-Jander, Qualitative Analyse
250 Lausberg, Romanische Sprachwissenschaft II
252 Vetter, Elektrochemie I
252 Vetter, Elektrochemie II
257 Humburg, Gleichstrommaschine I
264 Lockemann, Gesch. der Chemie I
265/265a Lockemann, Geschichte der Chemie II
270 Kirn, Einführung in die Geschichtswissenschaft
274 Zietemann, Dampfturbinen I
279 Jacob-Hohenleutner, Quellenkunde der deutschen Geschichte I
280 Jacob-Hohenleutner, Quellenkunde der deutschen Geschichte II
281 Leisegang, Einführung in die Philosophie
282 Haltenorth, Säugetiere
284 Jacob-Weden, Quellenkunde der deutschen Geschichte III
318/318a Schmidt-Beckers, Industrielle Kraft- u. Wärmewirtschaft
319 Krug, Australien und Ozeanien
329 Scharrer, Agrikulturchemie I
330/330a Scharrer, Agrikulturchemie II
335 Klug, Fette und Öle
336 Braun-Klug, Seifenfabrikation
342/342a Körting, Heizung und Lüftung I
343 Körting, Heizung und Lüftung II
344 Moser, Musikästhetik
354/354a Valentiner-König, Vektoren und Matrizen
355 Neger-Münch-Huber, Nadelhölzer
356 Lüdemann, Fische
374 Döring, Einführung in die theoret. Physik IV
375 Preller, Geschichte Englands I
389/389a Diels-Mattick, Pflanzengeographie
391 Kolms, Finanzwissenschaft II
394/394a Schilling, Von der Renaissance bis Kant
414/414a Tafel, Hebezeuge
422 Gottschald, Dt. Personennamen
423 Adler-Erlebach, Fünfstellige Logarithmen
432 Borchers, Metallkunde I
433/433a Borchers, Metallkunde II

434 Borchers-Hanke, Metallkunde III
435 Burau, Algebr. Kurven u. Flächen I
436/436a Burau, Algebr. Kurven und Flächen II
439 Jaeckel, Würmer
440 Jaeckel, Weichtiere
441 Jaeckel, Stachelhäuter
442 Hannemann, Schwämme und Hohltiere
443 Gruner-Deckert, Krebse
444 Reichenow, Einzeller
445 Asmus, Physikal.-chem. Rechenaufgaben
447/447a Herter, Kriechtiere
448 Haltenorth, Manteltiere
452 Bahrdt-Scheer, Stöchiometrische Aufgabensammlung
468 Großmann, Vermessungskunde I
469 Großmann, Vermessungskunde II
476 Thum-Meysenbug, Die Werkstoffe des Maschinenbaues I
483 Henglein, Lötrohrprobierkunde
492 Stolz-Debrunner, Geschichte der lateinischen Sprache
499 Niese-Küchler, Autogenes Schweißen
500 Simmel, Hauptprobleme der Philosophie
536 Lehmann, Kant
538 Rumpf, Archäologie I
539 Rumpf, Archäologie II
540 Rumpf, Archäologie III
557 Nestle-Liebich, Gesch. der griech. Literatur II
561 Matthes, Werkzeugmaschinen I
562 Matthes, Werkzeugmaschinen II
564 Behn-Hoernes, Kultur der Urzeit I
565 Behn-Hoernes, Kultur der Urzeit II
566 Behn-Hoernes, Kultur der Urzeit III
571 Lehmann, Philosophie des 19. Jahrhunderts I
576/576a Moser, Gesangskunst
579 Müller-Schulze, Techn. Tabellen
580/580a Sedlaczek-Fischer-Buch, Walzwerke
583/583a Engel, Maschinen der Eisenhüttenwerke
584/584a Müller, Kinematik
585 Dehnert, Verkehrswasserbau I
587 Kalitsunakis-Steinmetz, Neugriech.-dt. Gesprächsbuch
589 Tochtermann, Maschinenzeichnen I
590 Tochtermann, Maschinenzeichnen II
594 v. Lengerken, Insekten
597 Dehnert, Verkehrswasserbau II
601 Mutschmann-Scherer, Engl. Phonetik
608 Erman-Krückmann, Hieroglyphen
619/619a Buchwald, Kristalloptik
665 Ludin-Borkenstein, Wasserkraftanlagen I
666/666a Ludin-Borkenstein, Wasserkraftanlagen II
668 Knopp, Funktionentheorie I
677 Altheim, Röm. Geschichte II
679 Altheim, Röm. Geschichte III
684 Altheim, Röm. Geschichte IV
691 Fauser, Kulturtechn. Bodenverbesserungen I
692 Fauser, Kulturtechn. Bodenverbesserungen II
698/698a Schulze, Allgemeine u. physikalische Chemie II
703 Knopp, Funktionentheorie II
708 Meissner-Oberhuber, Keilschrift
709 Lehmann, Philosophie des 19. Jahrhunderts II
711 Kesselring, Berechnung der Schaltgeräte
714/714a zur Megede, Technik selbsttätiger Regelungen
715 Zietemann, Dampfturbinen II
716 Zietemann, Dampfturbinen III
718 Neger-Münch-Huber, Laubhölzer

728/728a Pirani-Fischer-Runge, Graph. Darstellung in Wissenschaft u. Technik
735 Ekwall, Historische neuengl. Laut- und Formenlehre
746/746a Pfanzagl, Allg. Methodenlehre der Statistik I
747/747a Pfanzagl, Allg. Methodenlehre der Statistik II
756/756a Kalitsunakis, Gramm. d. Neugriech. Volksspr.
763/763a Beer-Meyer, Hebräische Grammatik I
764/764a Beer-Meyer, Hebräische Grammatik II
768/768a Bieberbach, Einführung in die konforme Abbildung
769/769a Beer-Meyer, Hebräisches Textbuch
770 Schlingloff, Religion des Buddhismus II
776 Kolms, Finanzwissensch. III
780 Krahe, Germ. Sprachwiss. II
781 Weigert, Stilkunde II
782/782a Kolms, Finanzwissenschaft IV
786 Schulze, Molekülbau
796/796a Meiners-Wiesenewsky, Elektr. Höchstspannungs-Schaltanlagen
807 Kropp, Erkenntnistheorie
809 Moser, Harmonielehre I
810 Moser, Harmonielehre II
826 Koch, Philosophie d. Mittelalters
827 Schwaiger, Elektromotorische Antriebe
831 Erismann, Allg. Psychologie I
832/382a Erismann, Allg. Psychologie II
833 Erismann, Allg. Psychologie III
834/834a Erismann, Allg. Psychologie IV
837/837a Baumgartner, Gruppentheorie
845 Lehmann, Phllosophie im ersten Drittel des 20. Jhs. I
847 Herter, Lurche
850 Lehmann, Philosophie im ersten Drittel des 20. Jhs. II
851/851a Moede, Psychologie des Berufs- und Wirtschaftslebens
857 Capelle, Griech. Philosophie I
858 Capelle, Griech. Philos. II
859 Capelle, Griech. Philos. III
862 Großmann, Vermessungskunde III
863 Capelle, Griech. Philos. IV
866 Bieler, Röm. Literaturgeschichte II
869 Freye, Vögel
875 Hofmann, Geschichte der Mathematik II
877 Knopp, Aufgabensammlung zur Funktionentheorie I
878 Knopp, Aufgabensammlung zur Funktionentheorie II
881 Humburg, Gleichstrommaschine II
882 Hofmann, Geschichte der Mathematik III
883 Stuloff, Mathematik der neuesten Zeit
893 Treue, Dt. Geschichte von 1806—1890
894 Treue, Dt. Geschichte von 1890 bis zur Gegenwart
902 Müller, Dynamik I
903 Müller, Dynamik II
910 Jaeger, Afrika I
911 Jaeger, Afrika II
915 Sperber-Fleischhauer, Gesch. der Deutschen Sprache
917/917a Böhm, Versicherungsmathematik II
920/920a) Hoheisel, Gewöhnliche Differentialgleichungen
921 Jantzen-Kolb, W. v. Eschenbach. Parzival
924 Brandenstein, Griechische Sprachwissenschaft III
929 Schirmer-Mitzka, Dt. Wortkunde
930 Krull, Elementare und klassische Algebra I
931 Hasse, Höhere Algebra I
932 Hasse, Höhere Algebra II
933 Krull, Elementare und klassische Algebra II
936 Thum-Meysenbug, Werkstoffe d. Maschinenbaues II
942 Damerau, Polnische Grammatik

952 Schäfer, Transformatoren
953 Zipperer, Techn. Schwingungslehre I
961/961a Zipperer, Techn. Schwingungslehre II
965 Dehnert, Wehr- und Stauanlagen
970/970a Baldus-Löbell, Nichteuklidische Geometrie
972 Herter-Urich, Vergleichende Physiologie der Tiere I
973 Herter-Birukow, Vergleichende Physiologie der Tiere II
978 Kleinlogel, Baustoffverarbeitung und Baustellenprüfung d. Betons
984 Graf, Baustoffe des Hoch- und Tiefbaues
999/999a Kamke, Mengenlehre
1000 Jaspers, Geistige Situat. der Zeit
1003 Hoheisel, Partielle Differentialgleichung
1008/1008a Mellerowicz, Allgem. Betriebswirtschaftslehre I
1009 Bechert-Gerthsen-Flammersfeld, Atomphysik I
1014 Huttenlocher, Mineral- und Erzlagerstättenkunde I
1015/1015a Huttenlocher, Mineral- u. Erzlagerstättenkunde II
1017 Döring, Einführung in die theoret. Physik V
1020 Niese-Dienst, Elektrische Schweißverfahren
1031/1031a Apel-Ludz, Philosophisches Wörterbuch
1033 Bechert-Gerthsen-Flammersfeld Atomphysik II
1034 Kranefeldt-Jung, Therapeutische Psychologie
1035 Altheim, Röm. Religionsgeschichte I
1039 Dovifat, Zeitungslehre I
1040 Dovifat, Zeitungslehre II
1044 Tölke, Talsperren
1045 Schubert, Technik des Klavierspiels
1051/1051a Stolberg-Wernigerode, Gesch. d. Vereinigten Staaten
1052 Althelm, Röm. Religionsgeschichte II
1059/1059a Hoheisel, Aufgabenslg. z. d. gew. u. part. Differentialgleichungen
1061 Grodzinski-Lechner, Getriebelehre I
1062 Grodzinski-Lechner, Getriebelehre II
1065 Haller-Dannenbauer, Von d. Karolingern zu den Staufern
1070 Sauter, Differentialgleichungen der Physik
1074 Koschmieder, Variationsrechnung I
1075 Koschmieder, Variationsrechnung II
1076/1076a Endres, Verbrennungsmotoren I
1077 Haller-Dannenbauer, Von den Staufern zu den Habsburgern
1078 Troche, Stahlbetonbau
1082 Hasse-Klobe, Aufgabensammlung zur höheren Algebra
1085 Lietzmann-Aland, Zeitrechnung
1086 Müller, Dt. Dichten und Denken
1088 Preller, Gesch. Englands II
1092 Wickop, Fenster, Türen, Tore
1094 Hernried, System. Modulation
109f Viëtor, Dt. Dichten und Denken
1099 Hoheisel, Integralgleichungen
1105 Hartung, Dt. Geschichte im Zeitalter der Reformation
1108 de Boor-Wisniewski, Mittelhochdeutsche Grammatik
1109 Knopp, Elemente der Funktionentheorie
1111/1111a Naumann-Betz, Althochdt. Elementarbuch
1113/1113a Strubecker, Differentialgeometrie I
1114 Schubel, Engl. Literaturgeschichte I
1115 Ranke, Altnord. Elementarbuch

1116 Schubel, Engl. Literaturgeschichte II
1117 Haller-Dannenbauer, Eintritt der Germanen in die Geschichte
1121 Naumann, Dt. Dichten u. Denken
1122 Feist, Sprechen und Sprachpflege
1123/1123a Bechert-Gerthsen-Flammersfeld, Atomphysik III
1124 Schubel, Engl. Literaturgeschichte III
1125 Lehnert, Altengl. Elementarbuch
1127 Hartmann, Geschlecht u. Geschlechtsbestimmung im Tier- und Pflanzenreich
1128 Buchner, Symbiose der Tiere
1130 Dibelius-Kümmel, Jesus
1131 Scholz-Schoeneberg, Einführung in die Zahlentheorie
1132 Frühauf, Überspannungen
1134 Kuckuck, Pflanzenzüchtung I
1135 Lehnert, Beowulf
1137 Heil, Entwicklungsgesch. d. Pflanzenreiches
1138 Hämmerling, Fortpflanzung im Tier- und Pflanzenreich
1140 Unger, Induktionsmaschine
1141 Koller Hormone
1142 Meissner-Lehnert, Shakespeare
1144 Gehler-Herberg, Festigkeitslehre I
1145/1145a Herberg-Dimitrov, Festigkeitslehre II
1146 Putz, Synchronmaschine
1147 v. Waltershausen, Kunst d. Dirigierens
1148 Pepping, Der polyphone Satz I
1152 Dehnert, Verkehrswasserbau III
1153/1153a Mellerowicz, Allgem. Betriebswirtschaftslehre II
1154/1154a Mellerowicz, Allgem. Betriebswirtschaftslehre III
1155 Schwartz, Mikrobiologie I
1156/1156a Meinke, Komplexe Berechnungen v. Wechselstromschaltungen
1157 Schwartz, Mikrobiologie II
1158/1158a Mayrhofer, Sanskrit-Grammatik
1159 Jungbluth, Gießereitechnik I
1160 Dibelius-Kümmel, Paulus
1161 Kaestner, Spinnentiere
1162 Seidel, Entwicklungsphysiologie der Tiere I
1163 Seidel, Entwicklungsphysiologie der Tiere II
1164/1164a Pepping, Der polyphone Satz II
1165/1165a Bechert-Gerthsen-Flammersfeld, Atomphysik IV
1169 Paulsen, Allgemeine Volkswirtschaftslehre I
1170 Paulsen, Allgemeine Volkswirtschaftslehre II
1171 Paulsen, Allgemeine Volkswirtschaftslehre III
1172 Paulsen, Allgemeine Volkswirtschaftslehre IV
1173 Hamann-Funke-Hermann, Chemie der Kunststoffe
1176/1176a Lorenzen, Form Logik
1178/1178a Kuckuck, Pflanzenzüchtung II
1179/1179a Strubecker, Differentialgeometrie II
1180/1180a Strubecker, Differentialgeometrie III
1181 Franz, Topologie I
1182/1182a Franz, Topologie II
1183/1183a Nicolas, Finanzmathematik
1184 Endres, Verbrennungsmotoren II
1185 Endres, Verbrennungsmotoren III
1186/1186a Mellerowicz, Allgem. Betriebswirtschaftslehre IV
1187 Lau, Luther
1188/1188a Lehmann, Photogrammetrie
1189/1189a Päsler, Mechanik
1190 Stupperich, Melanchthon
1191/1191a Bräuer, Slav. Sprachwissenschaft I
1193 Fürstenberg, Wirtschaftssoziologie

1194 Wendt, Gesch. d. Volkswirtschaftslehre
1195 Ohm, Allgem. Volkswirtschaftspolitik I
1196 Ohm, Allgem. Volkswirtschaftspolitik
1197/1197a Onasch, Einf. in die Konfessionskunde der orthodoxen Kirchen
1198 Engel, Straßenverkehrstechnik
1199 Lausberg, Romanische Sprachwissenschaft III, 1. Teil
1200/1200a Lausberg, Romanische Sprachwissenschaft III, 2. Teil
1201/1201a Dehn, Versuche zur allgem. u. phys. Chemie
1202/1202a Nagel, Gesch. des christl. Gottesdienstes
1203 Wendland, Sozialethik
1204 Scheurig, Zeitgeschichte
1205/1205a Hofmann, Ideengeschichte d. soz. Bewegung
1206/1206a Langen, Lineare Programmierung
1208 Lausberg, Romanische Sprachwissenschaft IV
1209/1209a Bock, Therm. Verfahrenstechnik I
1210/1210a Bock Therm. Verfahrenstechnik II
1211/1211a Bock, Therm. Verfahrenstechnik III
1212/1212a Hilf, Arbeitswissenschaft
1213/1213a Kosiol, Buchhaltung und Bilanz
1216/1216a Bauer, Wahrscheinlichkeitstheorie I
1217 Bauer, Wahrscheinlichkeitstheorie II
1219 Schmidt-Clausing, Zwingli
1220 Zemann, Kristallchemie

# Autorenregister


Adler 12
Aland 6
Altheim 4, 7
Apel 3
Asmus 15

Bahrdt 16
Baldus 13
Barner 13
Bauer 14
Baumgartner 13
Bechert 14, 15
Beckers 23
Beer 9
Behn 6
Berneker 10
Betz 8
Beutel 16
Beyer 22
Bieberbach 14
Biehle 7
Bieler 9
Birukow 17
Blümcke 16
Bock 16
Böhm 14
de Boor 8
Borchers 20
Borkenstein 22
Bräuer 10
Brandenstein 9
Braun 16
Brauns 18
Bruhns 19
Buch 21
Buchner 16
Buchwald 19
Burau 12

Capelle 3
Chudoba 18

Dahrendorf 4, 11
Damerau 10
Dannenbauer 6
Debrunner 9
Deckert 17
Dehn 15
Dehnert 23
Dibelius 4
Diels 17
Dienst 22
Dimitrov 23
Döring 14
Dovifat 11

Ehrlich 4
Ekwall 8
Ende, vom 21
Endres 22
Engel, E. 20
Engel, L. 21
Erismann 4
Erlebach 12
Erman 9

Fauser 18
Feist 7
Fischer, F. 21
Fischer, J. 20
Fischer, P. B. 12
Flammersfeld 14, 15
Fleischhauer 7
Franz 13
Freye 18
Frühauf 20
Fürstenberg 4, 11
Funke 16

Gehler 23
Geitler 17
Gerthsen 14
Gottschald 7, 8
Graewe 15
Graf 23
Grodzinski 21
Großmann 22
Grotemeyer 13
Gruner 17

Haack 13
Hämmerling 16
Haller 6
Haltenorth 18
Hamann 16
Hanke 21
Hannemann 17
Hartmann 16
Hartung 6
Hassak 16
Hasse 12
Haussner 12
Heil 17
Heissler 10, 22
Hempel 8
Henglein 19
Herberg 23
Hermann 16
Hernried 5
Herter 17, 18
Hessenberg 13
Hilf 11, 20
Hoernes 6
Hoffmann 9
Hofmann, H. 15
Hofmann, J. E. 12
Hofmann, W. 4
Hofstätter 4
Hofstaetter 7
Höheisel 13
Hohenleutner 6
Huber 17
Humburg 20
Huttenlocher 18

Jacob 6
Jaeckel 17, 18
Jaeger 10
Jahr 15
Jander 15
Jantzen 7
Jaspers 3
Jiriczek 7
Jung 4
Jungbluth 21

Kaestner 17
Kalitsunakis 9
Kamke 13
Kesselring 20

Kirn 5
Kleinlogel 23
Klemm 15
Klobe 12
Klug 16
Kneser 13
Knoll 15
Knopp 13
Koch 3
König 14
Körting 23
Kolb 7
Koller 16
Kolms 10
Koschmieder 14
Kosiol 10
Krahe 8
Kranefeldt 4
Kresze 15
Kropp 3
Krückmann 9
Krug 10
Krull 12
Kuckuck 17
Küchler 22
Kümmel 4
Kutzelnigg 16

Landmann 3
Langen 12
Langosch 7
Lau 4
Lausberg 9
Lechner 21
Lehmann, G. 3
Lehmann, G. 22
Lehnert 8
Leisegang 3
Lengerken, von 17
Liebich 9
Lietzmann 6
Lockemann 15
Löbell 13
Lorenzen 3, 12
Lotze 18
Ludin 22
Ludz 3
Lüdemann 18

Mahler 15
Marcard 22
Matthes 21
Mattick 17
Maurer 8
Mayrhofer 8
Megede, zur 20
Meiners 20
Meinke 20
Meissner, B 9
Meißner, P. 8
Mellerowicz 10
Meyer 9
Meysenbug 21
Mitzka 7
Moede 4, 11
Mohr 20
Moser 5
Müller, G. 7
Müller, H. R. 14, 21
Müller, W. 20, 21
Münch 17
Mutschmann 8

Nagel 4
Naumann 7, 8
Neger 17
Nestle 9
Nicolas 11, 14
Niese 22

Oberhuber 9
Oehlmann 5
Ohm 10
Onasch 4

Päsler 14
Paulsen 10
Pepping 5
Pfanzagl 11
Pirani 20
Preller 7
Putz 20

Ramdohr 18, 19
Ranke 8
Reichenow 17
Ringleb 12
Rohrbach 12
Rumpf 5
Runge 20

Sauter 15
Schäfer 20
Scharrer 18
Scheer 16
Scherer 8
Scheurig 6
Schilling 3
Schirmer 7
Schlenk 15
Schlingloff 5
Schmid 9
Schmidt 23
Schmidt-Clausing 4
Schneider 7
Schoeneberg 12
Scholz 12
Schubel 8
Schubert, H. 12
Schubert, K. 5
Schulze, E. 20
Schulze, W. 15
Schwaiger 20
Schwartz 16
Sedlaczek 21
Seidel 17
Simmel 3
Sperber 7
Steinmetz 9
Stolberg-Wernigerode, zu 7
Stolz 9
Strubecker 14
Stuloff 12
Stupperich 4

Tafel 22
Teichmann 23
Thum 21
Tochtermann 21
Tölke 23
Treue 6
Troche 23

Unger 20
Urich 17

Valentiner 14
Vasmer 10
Vetter 16
Viëtor 7
Vogel 18

Waltershausen, v. 5
Weden 6
Weigert 5
Weimer 4
Wendland 4
Wendt 10
Wickop 23
Wiese, von 4
Wiesenewsky 20
Wisniewski 7, 8
Witting 13

Zemann 16, 18
Zietemann 22
Zipperer 21



Printed in Germany 150/III/65